



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones

PROYECTO FIN DE CARRERA

Estudio de una superficie soft para reducir el acoplo mutuo entre parches

Autor: **Silvia Jaramillo Villaluenga**

Tutor: **Luis de Inclán Sánchez**

Leganés, Junio 2015

Título: *Estudio de una superficie soft para reducir el acoplo mutuo entre parches.*

Autor: *Silvia Jaramillo Villaluenga*

Director: *Luis de Inclán Sánchez*

EL TRIBUNAL

Presidente: *Harold Molina Bulla*

Vocal: *Julio Villena Román*

Secretario: *Manuel Montoya Catalá*

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 15 de junio de 2015 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

*“Piensa, cree, sueña
y atrevete”
Walt Disney*

Agradecimientos

A mi madre, por estar siempre detrás de mí y haber hecho de mí lo que hoy soy. Sé que desde donde me estés viendo estarás orgullosa.

A mi padre, por tus consejos para hacerme crecer como persona y dar todo lo mejor de ti. Gracias por tirar del carro estos últimos años.

A mi hermana, que además de hermana eres amiga. Gracias por todos esos momentos juntas, esos desayunos de fin de semana en los que ponerse al día y esas tardes de estudio con un helado en la terraza viendo a la gente pasar.

A mi “gordito”, por tu apoyo incondicional, tu paciencia, tu comprensión y por escucharme siempre que lo he necesitado. Gracias por demostrarme que las cosas “se hacen o no se hacen pero no se intentan”.

A mi familia por darme su apoyo en los buenos y los malos momentos.

A mis compañeros de clase, en especial a esa chica con la que compartí la mayor parte de las clases y prácticas a contrarreloj.

A mi tutor, gracias por tu amabilidad y por darme la oportunidad de realizar este proyecto y aprender más sobre el mundo de la tecnología impresa.

A toda esa gente, que de un modo u otro ha formado parte de mi vida y me han hecho aprender.

A todos, ¡Muchas gracias!

Resumen

En este proyecto se tratan algunas problemáticas de la tecnología impresa. Más concretamente se centra en el análisis y control de las ondas de superficie que viajan por el sustrato en el que están contenidas. Estas ondas, no deseadas, se logran disminuir mediante un tipo de estructuras denominadas soft.

En el trabajo se diseña una superficie soft formada por tiras metálicas paralelas cortocircuitadas por vías metalizadas al plano de masa, para posteriormente analizarla de forma sistemática mediante los parámetros de Scattering. Este análisis se realiza con el programa CST Microwave Studio mostrando el comportamiento de dicha superficie en función de la variación de algunos de sus parámetros.

Por otro lado, se diseña un array de dos parches cuadrados y posteriormente se analiza con la misma herramienta para ver cuál es el acoplo mutuo existente entre ambos. A continuación se realiza el mismo análisis pero colocando entre las dos antenas una superficie periódica de dos y tres tiras. De este modo se puede observar cómo afecta el uso de una superficie soft al acoplo mutuo existente entre dos antenas impresas. Finalmente se obtiene una reducción del acoplo mutuo existente entre dos antenas de parche cuadradas entre 5 dB y 15 dB dependiendo del número de periodos utilizados.

Palabras clave: EBG, microstrip, antena de parche, array, acoplo mutuo, corrugaciones, corrugaciones planas.

Abstract

This document analyzes the problems of antenna printed technology. The main problem is related with superficial waves that exist in the substrate. The use of special structures called 'soft' reduces these undesired waves.

This work designs a soft surface made of metallic and parallel strips, short-circuited to ground by metalized via holes. This surface is analyzed by using scattering parameters with the software CST Microwave Studio, showing the performance of the structure when some parameters are modified.

In addition, this work shows an array design with two squared patches. This array is analyzed with the same software to see which is the mutual coupling produced. This analysis is repeated using two and three strips between the patches to see how a soft surface affects the mutual coupling and if this reduction is proportional to the number of periods between antennas.

To sum up, the study shows that the use of a soft surface reduce the mutual coupling between two squared patch antennas from 5 dB to 15 dB depending on the number of periods used.

Keywords: EBG, microstrip, patch antenna, array, mutual coupling, corrugations, planar corrugations.

Índice general

Introducción	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Motivación	13
1.3 Objetivos	14
1.4 Descripción del contenido	15
Análisis de las propiedades de las superficies soft	16
2.1 Introducción de la superficie y herramientas	17
2.2 Corrugaciones	18
2.3 Corrugaciones horizontales con paredes metálicas	19
2.4 Corrugaciones horizontales con vías	20
2.5 Herramienta software empleada	21
2.6 Diagrama de Brillouin	22
Análisis de una superficie soft	26
3.1 Estudio numérico de la superficie	26
3.2 Comportamiento de la superficie variando el ancho de la tira metálica	30
3.3 Comportamiento de la superficie con tapa metálica	32
3.4 Comportamiento de la superficie variando la separación entre las tiras	34
3.5 Comportamiento de la superficie variando la permitividad	35
3.6 Comportamiento de la superficie variando la altura de las vías	37
3.7 Comportamiento de la superficie variando la separación entre las vías	38

3.8	Resumen de los resultados obtenidos al estudiar la superficie soft	39
	Aplicación de una superficie soft.....	42
4.1	Tipos de antenas.....	43
4.2	Introducción a la tecnología microstrip	44
4.3	Tipos de ondas en la tecnología microstrip	44
4.4	Características de las antenas de parche	45
4.5	Tipos de alimentación de las antenas de parche	47
4.6	Array de antenas de parche	50
4.7	Aplicación de una estructura soft a un array de antenas de parche	53
4.8	Comparativa de los diagramas de radiación	55
4.9	Comparativa del campo eléctrico.....	64
	Conclusiones y líneas futuras	66
5.1	Conclusiones.....	66
5.2	Líneas futuras.....	68
	Referencias	70

Índice de figuras

Figura 1. Modelo simplificado de superficies soft/hard en que cual se intercalan tiras de conductores eléctricos perfectos (PEC) y magnéticos (PMC)	17
Figura 2. Superficie formada por corrugaciones metálicas y dieléctrico de permitividad ϵ_r	19
Figura 3. Corrugación horizontal con paredes metálicas laterales y permitividad ϵ_r	20
Figura 4. Corrugación horizontal con vías metálicas laterales unidas al plano de masa con permitividad ϵ_r	21
Figura 5. Diagrama de Brillouin para las corrugaciones transversales con dieléctrico $\epsilon_r=4.4$, $w=0.25\lambda_\epsilon$, $h=0.25\lambda_\epsilon$ y $g=0.035\lambda_\epsilon$	23
Figura 6. Diagrama de Brillouin para las corrugaciones horizontales con pared ($\epsilon_r=4.4$, $w=0.25\lambda_\epsilon$, $h=0.25\lambda_\epsilon$ y $g=0.035\lambda_\epsilon$)	23
Figura 7. Diagrama de Brillouin para una estructura formada por tiras sobre dieléctrico con vías en el borde ($w=0.25\lambda_\epsilon$, $g=0.035\lambda_\epsilon$, $h=0.06\lambda_\epsilon$ y $\epsilon_r=4.4$) y distancia entre vías $d_y=0.25\lambda_\epsilon$	24
Figura 8. Diagrama de Brillouin para una estructura formada por tiras sobre dieléctrico con vías metalizadas en el borde en funcion de la altura del sustrato y de la separación de las vías.	25
Figura 9. Representación esquemática de la superficie periódica	27
Figura 10. Representación de la superficie con CST	28
Figura 11. Red de dos puertos para una matriz de parámetros S	28

Figura 12. Parámetro S11 en función del ancho de las tiras w ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	30
Figura 13. Parámetro S12 en función del ancho de las tiras w ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	31
Figura 14. Representación del modelo utilizado compuesto por la superficie con tapa	32
Figura 15. Parámetro S11 en función de la altura de la tapa d ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	32
Figura 16. Parámetro S12 en función de la altura de la tapa d ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	33
Figura 17. Parámetro S11 en función de la altura de la periodicidad p ($\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	34
Figura 18. Parámetro S12 en función de la altura de la periodicidad p ($\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	34
Figura 19. Parámetro S11 en función de la permitividad ϵ_r ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	35
Figura 20. Parámetro S12 en función de la permitividad ϵ_r ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	36
Figura 21. Parámetro S11 en función de la altura de la vía h_s ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	37
Figura 22. Parámetro S12 en función de la altura de la vía h_s ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)	37
Figura 23. Parámetro S11 en función de la separación de las vías $svía$ ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$)	38
Figura 24. Parámetro S12 en función de la separación de las vías $svía$ ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$)	39
Figura 25. Recorrido de las ondas de superficie.....	45
Figura 26. Estructura de una antena de parche	46
Figura 27. Diagrama de radiación de una antena de parche cuadrada	47
Figura 28. Alimentación mediante línea microstrip: a) Conexión directa de la línea microstrip a la antena y b) Conexión de la línea microstrip mediante intersecciones ...	48
Figura 29. Alimentación por sonda coaxial.....	48
Figura 30. Acoplo por proximidad	49
Figura 31. Acoplo por ranura radiante	50

Figura 32. Adaptación de un array de dos parches cuadrados variando la posición de su alimentación.....	51
Figura 33. Frecuencia de trabajo de un array de dos parches respecto al tamaño de los parches	51
Figura 34. Nivel de acoplo mutuo entre dos antenas de parche respecto a la distancia que las separa.....	52
Figura 35. Array de dos antenas de parche.....	53
Figura 36. Array de dos parches con estructura soft de dos y tres tiras	54
Figura 37. Parámetros de acoplo mutuo simulados para un array y un array con dos y tres tiras	54
Figura 38. Diagrama de radiación del array de antenas sin estructura periódica	57
Figura 39. Diagrama de radiación del array de antenas con dos elementos.....	58
Figura 40. Diagrama de radiación del array de antenas con tres elementos.....	59
Figura 41. Variación en frecuencia del diagrama de radiación en el plano E para un array de dos parches	61
Figura 42. Variación en frecuencia del diagrama de radiación en el plano E para un array de dos parches con dos elementos.....	62
Figura 43. Variación en frecuencia del diagrama de radiación en el plano E para un array de dos parches con tres elementos.....	63
Figura 44. Campo eléctrico para un array de dos antenas de parche	64
Figura 45. Campo eléctrico para un array de dos antenas de parche cuadradas con dos elementos.....	65
Figura 46. Campo eléctrico para un array de dos antenas de parche cuadradas con tres elementos.....	65

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de los parámetros de la superficie y valores iniciales	27
Tabla 2. Variación numérica en función del ancho de las tiras w	31
Tabla 3. Variación numérica en función de la altura de la tapa d	33
Tabla 4. Variación numérica en función de la periodicidad p	35
Tabla 5. Variación numérica en función de la permitividad ϵ_r	36
Tabla 6. Variación numérica en función de la altura de la vía h_s	38
Tabla 7. Variación numérica en función de la separación entre vías $s_{vía}$	39
Tabla 8. Resumen del modo en que afecta la modificación los parámetros a una superficie soft	40
Tabla 9. Descripción de los parámetros de un array de dos antenas de parche	52

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se va a describir cuál es el problema que motiva este proyecto fin de carrera situando en este contexto la aparición de estructuras y superficies periódicas que permiten mejorar algunos de los inconvenientes que presenta el uso de antenas de parche. Además se incluye una breve descripción del contenido que se puede encontrar en cada capítulo.

1.1 Antecedentes

Desde los últimos años hasta a la actualidad ha ido en aumento una mayor necesidad de estar comunicados y de tener información en cualquier lugar, en cualquier momento y de una forma más eficiente. Y no sólo eso, sino que los dispositivos utilizados para cubrir esas necesidades utilizan tecnologías más ligeras y de un tamaño cada vez menor para que su uso sea más fácil y cómodo. Esto está relacionado directamente con la miniaturización continuada que se está produciendo en los terminales utilizados por los usuarios.

Conforme a lo mencionado anteriormente, en los últimos años se ha producido un aumento de las tecnologías inalámbricas, como telefonía móvil o GPS, para poder estar comunicados y disponer de servicios avanzados que cubran paulatinamente las necesidades anteriormente citadas.

La tecnología microstrip es adecuada para poder implementar muchos de los dispositivos diseñados para cubrir estas necesidades. Su reducido coste y su facilidad para integrar circuitos complejos son dos de los motivos por los que se ha generalizado su uso en una gran parte de los terminales. Además ofrece otras características atractivas como pueden ser su ligereza, sus dimensiones reducidas y robustez.

Aunque esta tecnología presenta bastantes ventajas, también hay que tener en cuenta que adolece de ciertos inconvenientes a la hora de utilizarla. Algunos de éstos se tratarán más adelante, pero uno de los más relevantes, y que cabe mencionarlo ahora, está relacionado con la existencia de ondas de superficie en el sustrato de la superficie microstrip. Estas ondas superficiales viajan por el dieléctrico en el que se encuentran las antenas impresas, generando de este modo; reflexiones, acoplos y pérdidas que afectan a sus prestaciones empeorando sus diagramas de radiación, aumentando los acoplos o disminuyendo su ancho de banda entre otros efectos.

Con el fin de solventar estos problemas han ido surgiendo diversas soluciones que logran minimizarlos. Una posibilidad es el diseño de estructuras periódicas que eliminen la radiación en determinadas bandas de frecuencias [2]. Es decir, estos elementos actúan como filtros que permiten la propagación en ciertas frecuencias, pero la prohíben en otras. Éstos se denominan estructuras de banda prohibida (en inglés EBG – Electromagnetic Band Gap).

Es por esto, que en este proyecto y haciendo uso de la tecnología microstrip y de las estructuras EBG se logra un servicio de comunicaciones mucho más rápido y seguro para los consumidores de telecomunicaciones.

1.2 Motivación

En los últimos años se han intentado buscar soluciones al problema causado por las ondas de superficie de las antenas de parche. En los años 80 y utilizando conceptos de la acústica, se utilizaban las corrugaciones para el diseño de antenas, por ejemplo las bocinas corrugadas. Alguno de los problemas de este tipo de estructura reside en su tamaño, su peso y difícil fabricación de modo que resulta complicado adaptarlas a diversas tecnologías. Es por ello que se busca una alternativa en tecnología impresa que ofrezca características similares pero siendo una versión horizontal. En el Capítulo 2 se muestra con más detalle la evolución de este tipo de estructuras.

El motivo por el que se realiza este trabajo es para estudiar el comportamiento y la aplicación de este tipo de superficies. En este caso se va a estudiar una superficie soft, que consiste en una versión plana de las corrugaciones clásicas compuesta por varias tiras metálicas y cortocircuitadas por vías metálicas al plano de masa. Gracias a este tipo

de superficies se logra atenuar uno de sus principales problemas, el relacionado con las ondas de superficie que viajan por el dieléctrico.

Las principales ventajas que ofrece este tipo de estructuras son:

- El reducido espacio que ocupan
- El bajo coste de fabricación
- Su poco peso
- La facilidad con que se construyen

Estas características cumplen con las necesidades mencionadas en el Epígrafe 1.1, las cuales a su vez están relacionadas con las actuales tendencias en las tecnologías inalámbricas.

1.3 Objetivos

Este trabajo se divide en tres grandes bloques. A continuación se muestra más en detalle los objetivos que se persiguen en cada uno de dichos bloques:

- Describir diferentes tipos de corrugaciones, mostrando cómo han ido evolucionando y explicando para cada caso cuáles son sus principales características.
- Mostrar cuales son las propiedades básicas de una superficie soft y analizar una estructura de este tipo. Para analizarla se modificarán alguno de los parámetros que componen su geometría y se estudiará su influencia en el comportamiento de las corrugaciones. Este estudio se realizará a través de un análisis del comportamiento de las distintas estructuras y elementos mediante un simulador comercial de onda completa. Para analizar con más detalle su comportamiento se mostrarán gráficas que representen su respuesta en frecuencia en términos de parámetros de dispersión respecto a sus parámetros más importantes.
- Realizar el desarrollo de una aplicación concreta. En esta aplicación se utilizará una superficie soft para reducir el acoplo mutuo existente en un array de antenas impresas. Este hecho se demostrará mediante parámetros de acoplo mutuo y a través diagramas de campo eléctrico. Además se estudiará si el uso de este tipo de estructuras afecta al diagrama de radiación de las antenas utilizadas.

1.4 Descripción del contenido

El documento está dividido en varios capítulos y estos a su vez en distintos epígrafes. A continuación se va a mostrar una breve descripción de lo que se estudiará en cada uno de los capítulos.

El trabajo consta de los siguientes cinco capítulos:

En el primer capítulo (Capítulo 1) se hace una breve introducción. En esta introducción se explica cómo surgen históricamente las estructuras EBG. Además se muestra cual es el motivo por el que se realiza este trabajo y por qué resulta interesante estudiar este tipo de superficies, es decir, cuál es el objetivo que se persigue con la realización de este trabajo.

En el siguiente capítulo (Capítulo 2) se detalla cuál es el funcionamiento de las estructuras soft y cuáles son los diferentes tipos que se han ido utilizando a lo largo de la historia, mostrando cuales son las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos. Adicionalmente se explica brevemente cuál es la principal herramienta que se utiliza en este trabajo para estudiarlas.

A continuación, se muestra el capítulo que ocupa gran parte de este documento (Capítulo 3). Está dedicado a explicar y mostrar un estudio numérico de una superficie periódica. En este estudio se enseñan imágenes resultado de realizar simulaciones al variar diversos parámetros de la superficie plana. Se explica el modo en el que afecta la variación de cada uno de esos parámetros.

El trabajo continúa (Capítulo 4) plasmando una aplicación de dicha estructura. Esta aplicación consistirá en incorporar una superficie soft a un array de dos antenas de parche y comprobar si se reduce el acoplo mutuo y en qué grado.

Por último (Capítulo 5), se finaliza el documento presentando las conclusiones obtenidas al realizar el estudio y una posible visión de futuro que se podría seguir.

Capítulo 2

Análisis de las propiedades de las superficies soft

Este capítulo tiene como objetivo explicar cómo funcionan las superficies soft y cuál es su evolución desde que fueron propuestas. Se desarrollan algunos tipos de estructuras y se explican cuáles son las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas. De este modo surge un modelo correspondiente a un conjunto de tiras metálicas paralelas cortocircuitadas por vías metalizadas unidas al plano de masa que es el que se estudia en este documento.

Además se menciona la herramienta empleada en este proyecto para simular el comportamiento de este tipo de superficies y por qué resulta interesante utilizarla.

2.1 Introducción de la superficie y herramientas

En los años 80, y utilizando un concepto proveniente de la acústica, se comenzaron a utilizar unas superficies que tienen unos efectos interesantes para las ondas electromagnéticas, éstas son las llamadas superficies soft y hard [7].

Estas superficies artificiales tienen una característica muy útil para el electromagnetismo, y es que son anisótropas. Esta propiedad consiste en que se favorece la propagación de las ondas electromagnéticas en una dirección en la que se tiene el máximo de potencia, dirección hard; y se impide la propagación de las mismas en la dirección perpendicular que es en la que idealmente no se propagaría potencia, conocida como dirección soft.

Las superficies a las que nos referimos, en un modelo idealizado se representan por tiras paralelas de diferentes anchuras, en las que se intercala conductor eléctrico perfecto (PEC) y conductor magnético perfecto (PMC).

Como se muestra en la Figura 1, la dirección soft es aquella que coincide con el eje transversal al de las tiras metálicas, mientras que la dirección hard lo hace con el eje longitudinal.

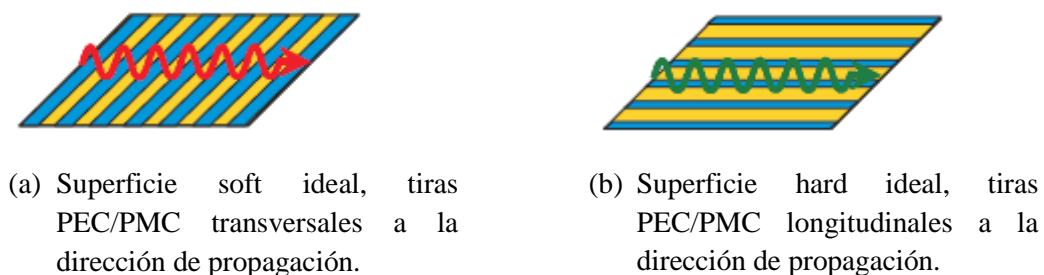


Figura 1. Modelo simplificado de superficies soft/hard en que cual se intercalan tiras de conductores eléctricos perfectos (PEC) y magnéticos (PMC)

Vamos a tomar las corrugaciones como ejemplo de superficie para estudiar más en detalle el funcionamiento de este tipo de estructuras. Si nos fijamos en la Figura 1, se pueden distinguir dos direcciones principales: la dirección longitudinal (eje x) y la transversal (eje y). Con esto se puede mostrar cual es la impedancia existente en la dirección soft o hard:

- Dirección soft

Para este caso se cumple que:

$$Z_t = \frac{E_y}{H_x} \rightarrow 0$$

$$Z_l = -\frac{E_x}{H_y} \rightarrow \infty$$

Esto significa que en el eje transversal (eje y) no existe impedancia que impida la propagación de campo. Mientras que en la dirección longitudinal (eje x) no se produce dicha propagación debido a que la impedancia (Z_l) tiende a infinito.

- Dirección hard

La característica de esta dirección de propagación es:

$$Z_t = \frac{E_y}{H_x} \rightarrow \infty$$

$$Z_l = -\frac{E_x}{H_y} \rightarrow 0$$

Por tanto, en el eje y (o eje transversal) debido a que la impedancia (Z_t) tiende a infinito no se produce propagación de campo. Por el contrario, en el eje x (o eje longitudinal) se favorece la propagación.

Con todo esto, y gracias a la condición de anisotropía, este tipo de estructuras se pueden utilizar para eliminar la transmisión de energía electromagnética en determinadas bandas de frecuencia, esto quiere decir, que actúan como filtros. Es decir, se pueden aplicar para conseguir eliminar algunos fenómenos indeseados como el acoplo mutuo o la radiación trasera.

2.2 Corrugaciones

A finales de los años 80 se empezaron a implementar estructuras de tipo soft/hard para evitar efectos no deseados en antenas (efectos como el acoplo mutuo, que es el que se trata en este documento). Inicialmente este tipo de estructuras se desarrollaron para

ser aplicadas a las antenas de tipo bocina (bocinas corrugadas) para conseguir minimizar las ondas de superficie que existían en el sustrato que rodeaba la antena.

Estas superficies tienen una forma de diente de sierra (Figura 2), en la cual se intercalan alternativamente tiras de PEC y PMC con distintos grosores para, de este modo, conseguir distintos efectos.

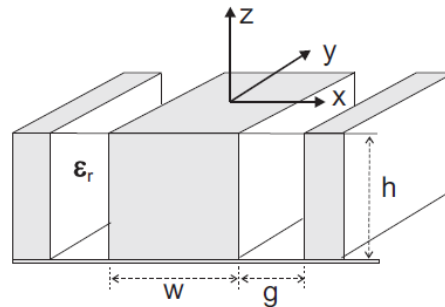


Figura 2. Superficie formada por corrugaciones metálicas y dieléctrico de permitividad ϵ_r

Esta estructura tiene la capacidad de ser filtrante en algunas frecuencias, lo cual puede resultar ventajoso, pero hay que tener en cuenta algunos problemas bastante significativos a la hora de utilizarlas:

- Son superficies grandes y pesadas
- Son difíciles de construir
- Tienen un elevado coste de fabricación
- No son compatibles con otras tecnologías

2.3 Corrugaciones horizontales con paredes metálicas

Debido a los inconvenientes de las corrugaciones clásicas mencionadas en la sección 2.2 y por el auge de la tecnología impresa, empezaron a surgir nuevas formas para conseguir la propiedad de anisotropía pero mejorando los inconvenientes de las corrugaciones clásicas [2].

Para conseguir mejorar los problemas que tienen las corrugaciones, lo primero que se intentó es realizar un diseño en el que éstas fueran planas para lograr una mejor adaptación al uso de la tecnología impresa. De este modo lo que se hizo fue horizontalizar las corrugaciones clásicas.

Esta nueva versión de corrugación horizontal (Figura 3) consiste en una formación de tiras metálicas de anchura w , sobre un sustrato con plano de masa y permitividad ϵ_r . Estas tiras están cortocircuitadas por paredes metálicas verticales que conectan su borde con el plano de masa. Para que esta nueva versión sea equivalente a las corrugaciones clásicas, se debe cumplir que el ancho de las tiras (w) debe ser igual que la altura de las corrugaciones.



Figura 3. Corrugación horizontal con paredes metálicas laterales y permitividad ϵ_r

Este tipo de superficies tienen parámetros que se pueden modificar con el fin de conseguir efectos diversos en diferentes bandas de frecuencias. Algunos de esos parámetros variables son el ancho de las tiras o la altura de la pared metálica con lo que se consiguen cambios frecuenciales de la banda prohibida.

Además, esta estructura es periódica únicamente en el eje longitudinal por lo tanto, se puede variar la localización de la pared metálica a lo largo de la tira, es decir, se puede situar por ejemplo en un lateral o centrada para conseguir diferentes efectos [3].

2.4 Corrugaciones horizontales con vías

Aunque las corrugaciones horizontales con paredes metálicas mejoran algunos inconvenientes de las corrugaciones clásicas, siguen presentando problemas. Uno de ellos reside en que las paredes metálicas presentan dificultades a la hora de ser fabricadas, son caras y siguen sin ser compatibles con la tecnología impresa.

Es por ello que se continuó estudiando la posibilidad de construir otra estructura más fácilmente y que mantenga un comportamiento similar al de las corrugaciones clásicas.

Una modificación que solventó el inconveniente de la compatibilidad con la tecnología impresa consiste en sustituir la pared metálica por vías metalizadas unidas al plano de masa (Figura 4). Es decir, esta nueva estructura está formada por tiras metálicas paralelas y cortocircuitadas al plano de masa por vías metalizadas [2].

Estas tiras resultan mucho más fáciles de construir y, además, la estructura es periódica tanto en el eje longitudinal (eje x) como en el eje transversal (eje y) debido a la periodicidad de las vías.

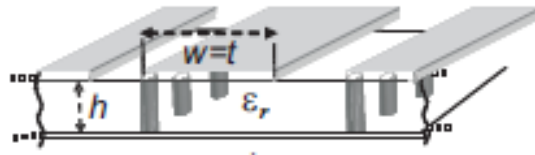


Figura 4. Corrugación horizontal con vías metálicas laterales unidas al plano de masa con permitividad ϵ_r

Gracias a que esta superficie está constituida por tiras y vías, se pueden realizar combinaciones en el eje transversal y longitudinal que hagan que se pueda modelar el comportamiento de esta estructura utilizando diferentes factores y así conseguir variar el comportamiento en frecuencia. En el Capítulo 3 se estudiará cuáles y cómo se modifican dichos parámetros y se mostrará cómo afectan a los resultados.

2.5 Herramienta software empleada

El estudio de la superficie soft y de una aplicación de la misma se va a realizar mediante un software de simulación electromagnético. Dicha herramienta es el programa de simulación CST MICROWAVE STUDIO de la empresa CST (Computer Simulation Technology)[6].

CST es una herramienta especializada en la simulación electromagnética en 3D de componentes de alta frecuencia. Dicho programa posibilita un análisis rápido y preciso de antenas, estructuras resonantes, conectores, filtros y muchos otros dispositivos. Además dispone de un interfaz gráfico muy potente que permite generar todo tipo de superficies y volúmenes, pudiéndose combinar para generar nuevas formas según convenga.

Dado que el estudio tanto para la superficie soft como para la antena de parche se realiza variando algunos parámetros y observando cual es el resultado de esa modificación, esta herramienta software resulta de gran utilidad porque permite realizar estos cambios con gran facilidad y obtener los resultados rápidamente.

2.6 Diagrama de Brillouin

A continuación se va a describir el diagrama de dispersión o también conocido como diagrama de Brillouin, a través del cual se representa la frecuencia frente a la constante de propagación, es decir, ω versus β .

Estos diagramas, calculados mediante métodos explicados en [3][6], representan la banda prohibida, quedando ésta localizada entre dos modos de la estructura. Estos diagramas se calculan utilizando el CST Microwave Studio. En ellos se representa en el eje vertical la frecuencia relativa (f/f_{soft}) y en el eje horizontal la constante de propagación k_x multiplicada por el periodo de la estructura d y normalizada respecto al desfase máximo π . Además se representa la línea de la luz para ver cuál es la frecuencia de corte de los modos, de forma que el primer modo no tiene punto de corte con esta línea mientras que el segundo modo tiene su punto de corte cuando se cruza con la línea de la luz.

Con esta representación, el rango de frecuencias en los que se encuentra la banda prohibida está definido por la frecuencia máxima para la que puede haber propagación de energía en el modo fundamental y el corte del segundo modo con la línea de la luz.

A continuación se va a mostrar los diagramas de dispersión de cada una de las estructuras mostradas a lo largo de este capítulo [6].

Diagrama de Brillouin para corrugaciones

La frecuencia para la condición soft, en la que la altura de las corrugaciones es $\lambda_0/4\sqrt{\epsilon_r}$, únicamente es exacta cuando el periodo de las corrugaciones tiende a cero [7]. Es por esto que a partir de ahora nos referiremos a esta frecuencia como soft y tomará el valor $f_{\text{soft}} = c/4h\sqrt{\epsilon_r}$. Tomaremos esta frecuencia soft como frecuencia de referencia para estudiar los diferentes tipos de corrugaciones.

Un ejemplo de diagrama de dispersión para una corrugación clásica es la que se muestra en la Figura 5. Se observa que aparece una banda prohibida entre $0.96f_{\text{soft}}$ y $1.98f_{\text{soft}}$. Se puede apreciar que la línea que representa el segundo modo y la línea de la luz tienen pendientes muy parecidas por lo que es más difícil identificar el final de la banda prohibida.

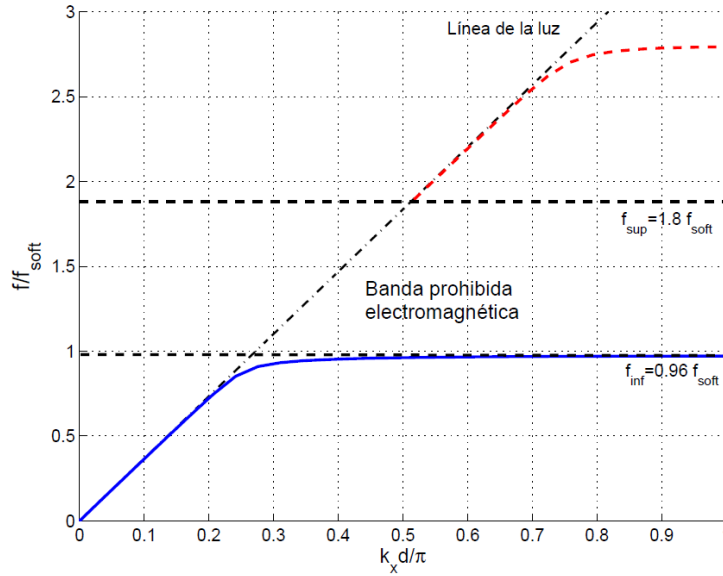


Figura 5. Diagrama de Brillouin para las corrugaciones transversales con dieléctrico $\epsilon_r=4.4$, $w=0.25\lambda_\epsilon$, $h=0.25\lambda_\epsilon$ y $g=0.035\lambda_\epsilon$

Diagrama de Brillouin para corrugaciones horizontales con paredes metálicas

Como ya se mencionó en el Epígrafe 2.3, debe cumplirse que la altura de las corrugaciones debe ser igual al ancho de las tiras metálicas, por lo que la frecuencia soft para este caso será $f_{\text{soft}}=c/4w\sqrt{\epsilon_r}$.

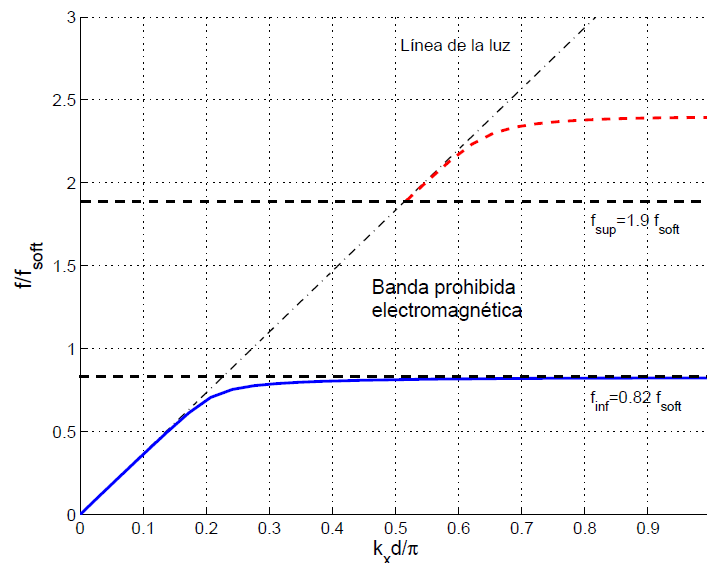


Figura 6. Diagrama de Brillouin para las corrugaciones horizontales con pared ($\epsilon_r=4.4$, $w=0.25\lambda_\epsilon$, $h=0.25\lambda_\epsilon$ y $g=0.035\lambda_\epsilon$)

En la Figura 6 se puede apreciar que las frecuencias superior e inferior para la banda prohibida son respectivamente $f_{\text{inf}}=0.82f_{\text{soft}}$ y $f_{\text{sup}}=1.9f_{\text{soft}}$ manteniendo el tamaño de la tira igual a la altura de las corrugaciones anteriores [6]. De este modo, el ancho para la banda prohibida es muy parecido al caso de las corrugaciones clásicas.

Diagrama de Brillouin para corrugaciones horizontales con vías

En este caso se va a estudiar cómo se comporta el diagrama de Brillouin para corrugaciones horizontales con vías metálicas [6].

En la Figura 7 se muestra el diagrama de Brillouin para una corrugación horizontal con vías. De esta figura se puede decir que las frecuencias inferior y superior para la banda prohibida son $f_{\text{inf}}=0.78f_{\text{soft}}$ y $f_{\text{sup}}=0.98f_{\text{soft}}$, es decir, es más estrecho que en los otros dos casos analizados.

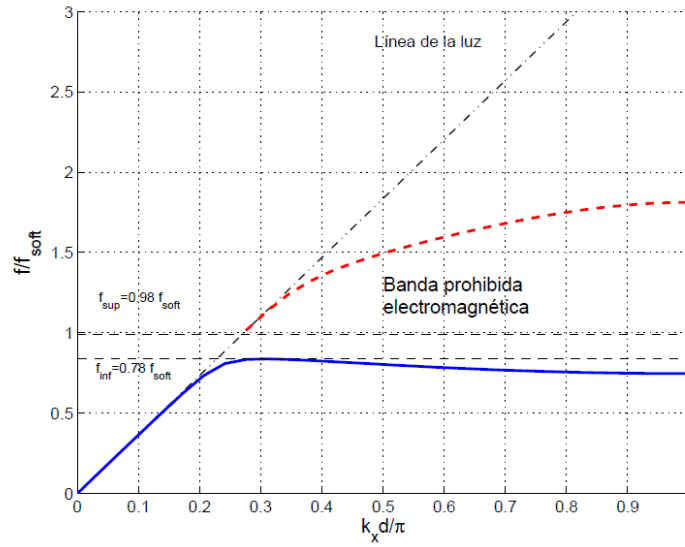


Figura 7. Diagrama de Brillouin para una estructura formada por tiras sobre dieléctrico con vías en el borde ($w=0.25\lambda\epsilon$, $g=0.035\lambda\epsilon$, $h=0.06\lambda\epsilon$ y $\epsilon_r=4.4$) y distancia entre vías $dy=0.25\lambda\epsilon$

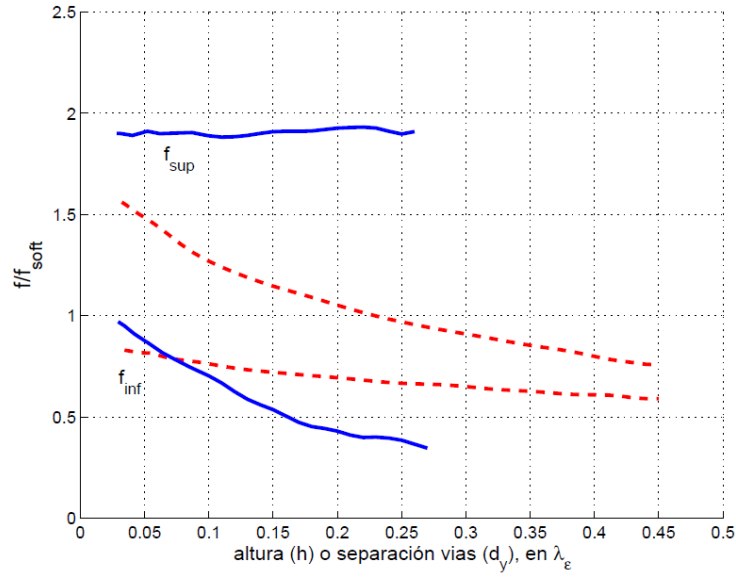


Figura 8. Variación de la banda prohibida, normalizada a la frecuencia f_{soft} . En función de la altura del sustrato (h) para las tiras con la pared metálica en el borde con trazo continuo ($w=0.25\lambda_e$, $g=0.035\lambda_e$ y $\epsilon_r=4.4$). En función de la separación de las vías (d_y) para la tira con vías en el lateral en trazo discontinuo ($w=0.25\lambda_e$, $g=0.035\lambda_e$, $h=0.06\lambda_e$ y $\epsilon_r=4.4$).

Además, en la Figura 8 se puede observar en trazo continuo la banda prohibida frente a la altura del sustrato, o lo que es lo mismo, la altura de las vías. Para ello se representa la frecuencia superior e inferior respecto al parámetro h dejando los demás parámetros fijos. Además, en trazo discontinuo se muestra el comportamiento de la banda prohibida respecto a la separación de las vías.

Observando dicha figura se puede decir que a medida que aumenta la altura de las vías también lo hace la banda prohibida. También se puede concluir que si la separación entre las vías aumenta entonces la banda prohibida se estrechará.

Capítulo 3

Análisis de una superficie soft

Uno de los motivos por el que resulta importante realizar estudios de una superficie soft es debido a que, como se mencionó en el Capítulo 2, tienen la capacidad de disminuir el acoplo mutuo entre antenas (condición de anisotropía). Este capítulo tiene como objetivo mostrar el diseño y estudio de una de estas superficies.

Con este estudio se pretende enseñar cómo se comporta dicha estructura cuando se produce una modificación en alguno de sus parámetros. La caracterización de este comportamiento se va a llevar a cabo mediante el estudio de los parámetros de dispersión, también llamados parámetros S.

3.1 Estudio numérico de la superficie

Ya hemos mencionado anteriormente que la tecnología impresa tiene el problema de estar afectada por las ondas de superficie que aparecen en el sustrato en el que se encuentran. Esto hace, que para este tipo de tecnología, aparezca un acoplo de energía entre las antenas vecinas. Por tanto, es necesario buscar soluciones que lo disminuyan en la medida de lo posible. Este texto se va a centrar en ver el comportamiento de una superficie soft para solucionar este tipo de problema.

En esta sección se va a realizar el estudio y simulación de una superficie soft plana mostrando cómo afecta a su funcionamiento en frecuencia cuando se varían alguno de los parámetros que la forman [2][7].

El diseño seleccionado en este documento para el estudio de esta superficie consiste en una estructura formada por cinco tiras metálicas sobre un sustrato, cortocircuitadas por diez vías también metalizadas a un plano de masa.

Para realizar el estudio se mostrarán los parámetros transmisión y reflexión de esta estructura, es decir, los parámetros S.

La nomenclatura utilizada para el estudio y los valores de los cuales se parte son los que aparecen en la Tabla 1. También se puede ver gráficamente qué representa cada uno de esos parámetros en la Figura 9. Alguno de esos valores se modificará para, mediante simulaciones, ver el efecto que tienen.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALORES
p	periodicidad	14 mm
h_s	altura de la vía	1.5 mm
ϵ_r	permitividad del dieléctrico	10
$r_{vía}$	radio de la vía	0.5 mm
m	número de tiras	5
t	espesor del metal de las tiras	0.03 mm
n	número de vías	10
p_{tira}	posición de la tira	$2 \cdot p + (w/2)$
w	ancho de la tira	12 mm
d	distancia de la tapa	3 mm
$s_{vía}$	separación entre las vías	5 mm
l_y	largo del sustrato	80 mm
l_x	ancho del sustrato	50 mm

Tabla 1. Descripción de los parámetros de la superficie y valores iniciales

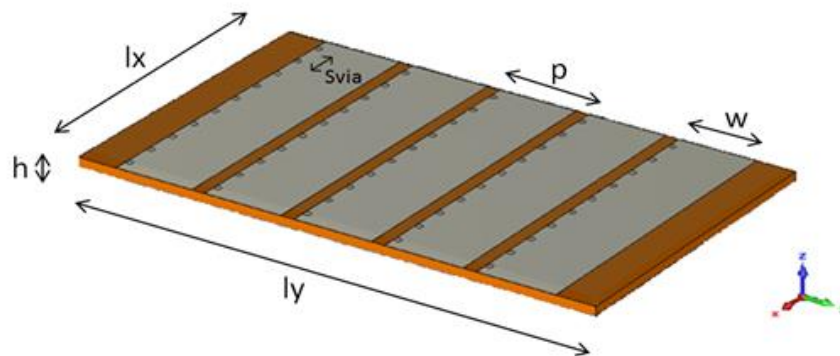


Figura 9. Representación esquemática de la superficie periódica

En las siguientes secciones se va a analizar el comportamiento de la superficie desde un punto de vista lo más realista posible. Este análisis se ha realizado utilizando el modelo que se muestra en la Figura 10. Con este modelo se obtendrán los parámetros S colocando en los extremos de la superficie dos puertos de guía de onda.

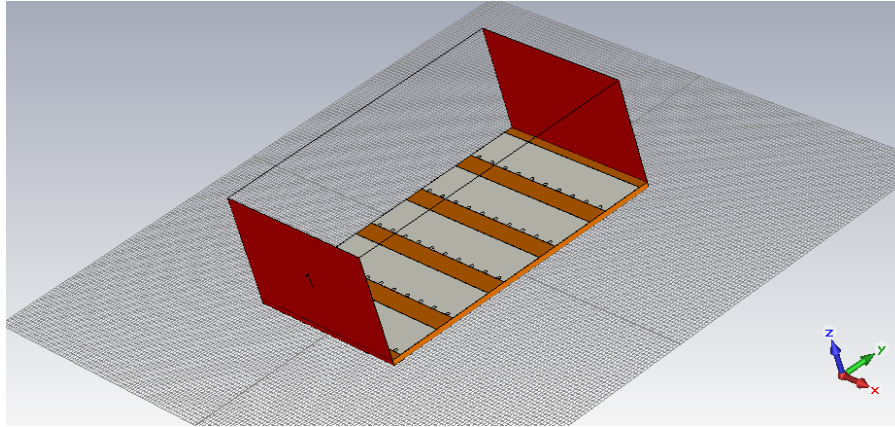


Figura 10. Representación de la superficie con CST

Uno de los conceptos clave cuando se habla de dispositivos de microondas son los parámetros de Scattering (o parámetros S). Con estos parámetros se representa la forma en la que tensiones y corrientes son afectadas cuando se desplazan por una línea de transmisión y se encuentran con una discontinuidad. Esto equivale a encontrarse una impedancia diferente de la impedancia característica de la línea.

Los parámetros S se representan matricialmente. En nuestro caso tenemos una matriz de dos puertos:



Figura 11. Red de dos puertos para una matriz de parámetros S

Teniendo en cuenta la Figura 11, la matriz de parámetros S viene dada por:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

Si expandimos las ecuaciones queda que:

$$b_1 = s_{11}a_1 + s_{12}a_2$$

$$b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2$$

Cada ecuación da la relación entre las ondas de potencia reflejada e incidente para cada uno de los puertos de la red, 1 y 2, en función de los parámetros S. Si consideramos una onda incidente en el puerto 1 (a_1) pueden resultar ondas existentes tanto en el puerto 1 (b_1) como en el puerto 2 (b_2). Sin embargo, si el puerto 2 está terminado en una carga idéntica a la impedancia del sistema (Z_0), entonces b_2 será absorbida haciendo que a_2 sea igual a 0. Por lo tanto:

$$s_{11} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad \text{y} \quad s_{21} = \frac{b_2}{a_1} = \frac{V_2^-}{V_1^+}$$

De la misma forma, si el puerto 1 está terminado en la impedancia del sistema, entonces a_1 se hace cero, dando:

$$s_{12} = \frac{b_1}{a_2} = \frac{V_1^-}{V_2^+} \quad \text{y} \quad s_{22} = \frac{b_2}{a_2} = \frac{V_2^-}{V_2^+}$$

De este modo, cada uno de los parámetros S tiene las siguientes descripciones:

- S_{11} es el coeficiente de reflexión a la entrada con la salida terminada en carga adaptada.
- S_{12} es la ganancia de transmisión directa con la salida terminada en carga adaptada. Indica la amplificación de la red en sentido directo
- S_{21} es la ganancia de transmisión inversa, con la entrada terminada en carga adaptada. Indica la amplificación de la red en sentido inverso
- S_{22} es el coeficiente de reflexión a la salida con la entrada terminada en carga adaptada.

Tanto para analizar la superficie soft como para posteriormente el array de antenas se utilizan estos parámetros ya que se considera nuestro modelo como un cuadripolo con dos puertos.

Con estos parámetros se muestra el coeficiente de reflexión (s_{11} y s_{22}) y de transmisión (s_{12} y s_{21}). El coeficiente de reflexión, por ejemplo el s_{11} , muestra cual es la potencia reflejada en la puerta 1 del cuadripolo respecto la potencia disponible en la puerta 1. Mientras que el coeficiente de transmisión, por ejemplo s_{21} , muestra la potencia entregada en la puerta 2 respecto la potencia disponible en la puerta 1.

De modo que resulta muy sencillo observar, por ejemplo, cual es el acoplo mutuo que se produce entre dos antenas mediante el parámetro de transmisión.

3.2 Comportamiento de la superficie variando el ancho de la tira metálica

Lo primero que se va a analizar es el efecto que produce sobre este tipo de superficies la modificación del ancho de las tiras metálicas. Si tomamos los valores que aparecen en la Tabla 1, se puede calcular de forma aproximada cual es la frecuencia de la primera banda prohibida de la superficie:

$$f = \frac{c}{4w\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 0.01 \cdot \sqrt{10}} = 2.37 \text{GHz}$$

Este valor se verá afectado según se vayan variando algunos de los parámetros de la Tabla 1. Tal y como se muestra en [2], el resultado esperado es que, a medida que disminuya el tamaño de la estructura, aumente la frecuencia de trabajo, es decir, el tamaño de la superficie y la frecuencia de la primera banda prohibida son inversamente proporcionales.

Este estudio se va a centrar en ver cómo estas modificaciones afectan a la frecuencia de trabajo, al ancho de banda, al nivel de potencia transmitida y al ancho de banda relativo para el que, en general, se pondrá una condición de caída alrededor de 5dB. Esta primera simulación se ha realizado con un rango de frecuencias bastante amplio para ver los armónicos y comprobar que realmente el primero de ellos está en torno a los 2.37 GHz. De este modo las simulaciones realizadas en los siguientes epígrafes se centrarán en esa frecuencia, puesto que es la primera banda prohibida de la estructura.

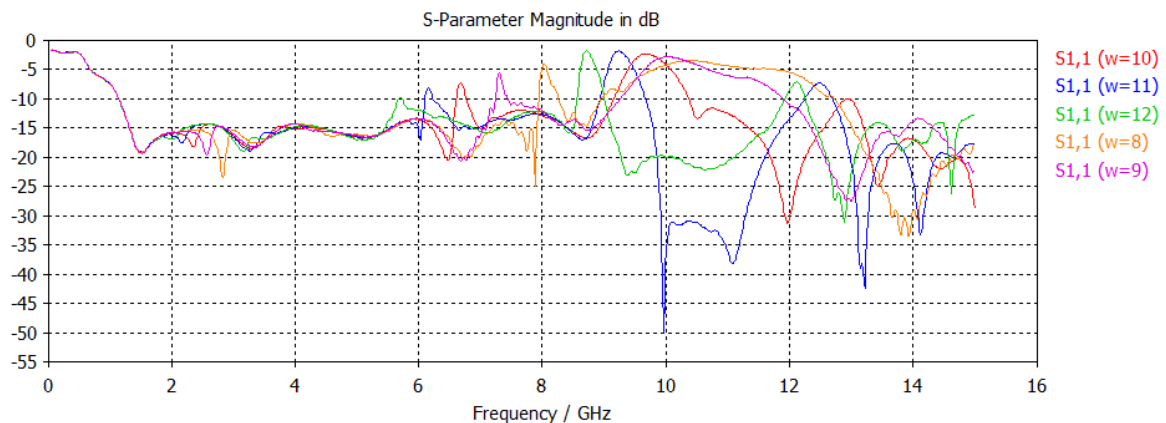


Figura 12. Parámetro S11 en función del ancho de las tiras w (p=14mm, $\epsilon_r=10$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $s_{vía}=5\text{mm}$)

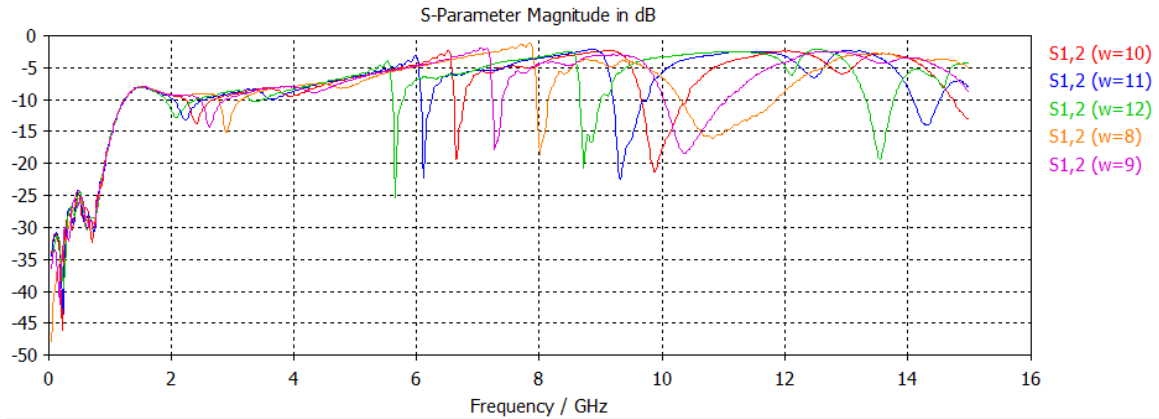


Figura 13. Parámetro S12 en función del ancho de las tiras w ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $s_{vía}=5\text{mm}$)

En las Figura 12 y Figura 13 se observa que efectivamente la frecuencia de funcionamiento de la superficie está en torno a los 2.37 GHz calculados. Además se ve que la estructura está perfectamente adaptada ya que el coeficiente de reflexión s_{11} tiene una caída superior a 10dB.

Cabe destacar que si se analiza el parámetro de transmisión s_{12} se observa que a medida que disminuye el ancho de la tira, aumenta la frecuencia de rechazo. Por otro lado, el nivel de potencia transmitida decrece ligeramente al aumentar w , mientras que el ancho de banda eliminado se mantiene prácticamente constante. Cuantitativamente estos datos se pueden ver en la Tabla 2.

	$w=8\text{mm}$	$w=9\text{mm}$	$w=10\text{mm}$	$w=11\text{mm}$	$w=12\text{mm}$
Frecuencia de rechazo	3GHz	2.7GHz	2.5GHz	2.3GHz	2 GHz
Nivel de potencia transmitida	-15dB	-14.37dB	-13.62dB	-13.13dB	-12.84dB
Ancho de banda eliminado	0,2GHz [2.9GH -3.1GHz]	0,2GHz [2.6GHz-2.8GHz]	0,2GHz [2.4GHz-2.6GHz]	0,2GHz [2.2GHz-2.4GHz]	0,2GHz [1.9GHz-2.1GHz]
BW (%)	6.7%	7.4%	8%	8.6%	10%

Tabla 2. Variación numérica en función del ancho de las tiras w

3.3 Comportamiento de la superficie con tapa metálica

A la hora de analizar las simulaciones se observó que los resultados obtenidos no estaban bien definidos ya que presentaban bastantes oscilaciones. De modo que se intentó buscar una solución para ofrecer resultados con mayor claridad.

Para resolver este problema, se demuestra que el uso de una tapa metálica [14] consigue que se aprecien las bandas de trabajo con mayor precisión sin modificar los modos que se excitan. Es por eso, que en esta sección se va a estudiar qué ocurre al colocar una tapa metálica sobre la superficie soft.

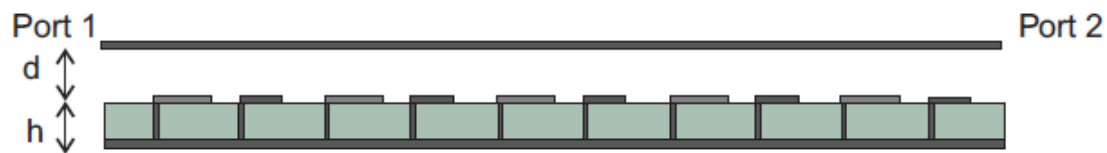


Figura 14. Representación del modelo utilizado compuesto por la superficie con tapa

La configuración es muy sencilla, únicamente hay que colocar una placa metálica paralela a la superficie soft que se desee estudiar. Para ello, el único requerimiento que debe cumplir es que la distancia a la superficie debe ser menor que $\lambda/4$, es decir, tal y como muestra la Figura 14, $d < \lambda/4$. Cumpliendo esto, las bandas prohibidas coincidirán con las de la estructura original sin tapa.

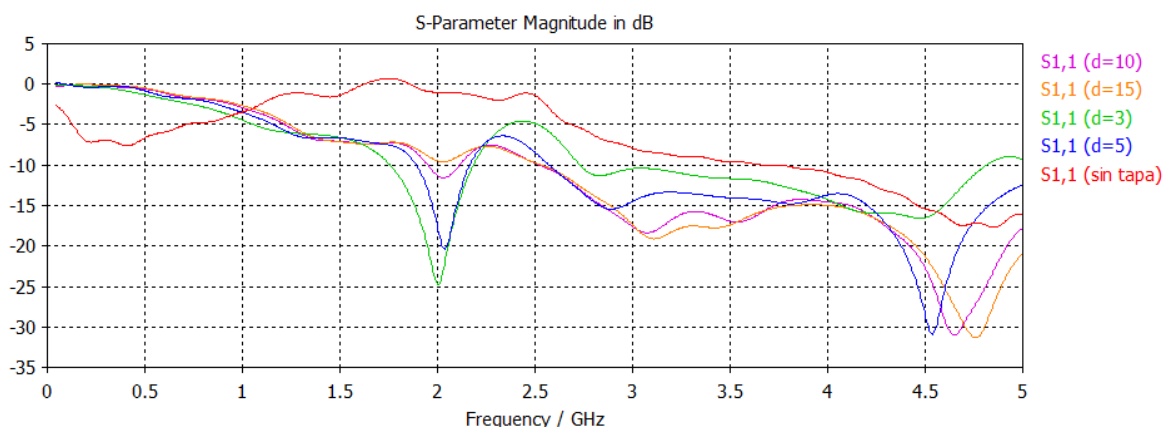


Figura 15. Parámetro S11 en función de la altura de la tapa d ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $s_{vía}=5\text{mm}$)

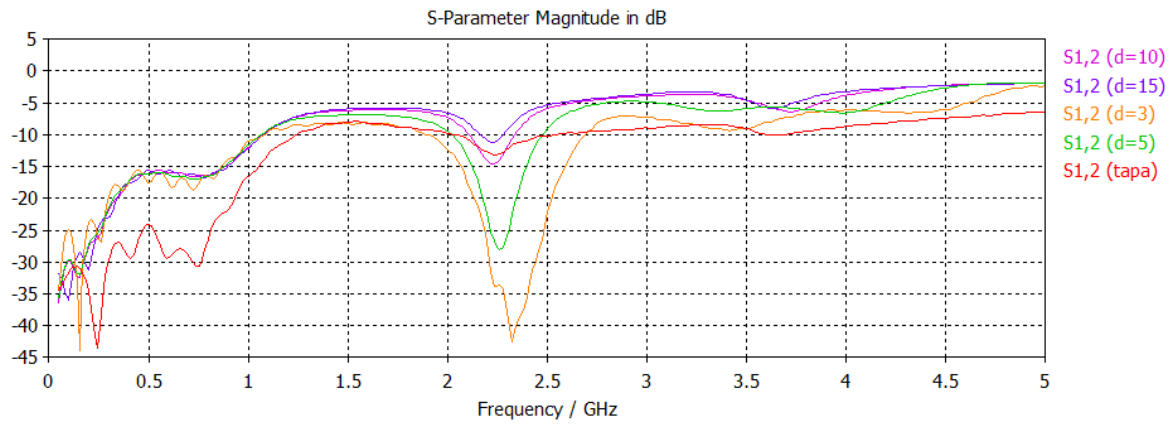


Figura 16. Parámetro S12 en función de la altura de la tapa d ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $rvia=0.5\text{mm}$, $svia=5\text{mm}$)

Tal y como se mencionó anteriormente, en las Figura 15 y Figura 16 produce un efecto en la banda prohibida consistente en que el nivel de rechazo sea más notorio sin afectar a la frecuencia de trabajo. Esto se observa numéricamente en la Tabla 3.

Gracias a que el uso de la tapa facilita el estudio de la superficie plana, en las siguientes secciones los estudios serán realizados con una tapa metálica colocada a una distancia $d=3\text{mm}$ puesto que es el valor que consigue que el nivel de potencia transmitido sea menor sin variar la frecuencia de rechazo. De este modo podemos obtener conclusiones válidas con mayor precisión.

	Sin tapa	d=3mm	d=5mm	d=10mm	d=15mm
Frecuencia de rechazo	2.2GHz	2.3GHz	2.2GHz	2.2GHz	2.2GHz
Nivel de potencia transmitida	-13dB	-40dB	-27dB	-15dB	-11dB
Ancho de banda eliminado	0.1GHz [2.3GHz-2.4GHz]	0.4GHz [2.2GHz-2.6GHz]	0.4GHz [2.1GHz-2.5GHz]	0.3GHz [2.1GHz-2.4GHz]	0.2GHz [2.2GHz-2.4GHz]
BW(%)	4.5%	17.4%	18.2%	13.6%	9.1%

Tabla 3. Variación numérica en función de la altura de la tapa d

3.4 Comportamiento de la superficie variando la separación entre las tiras

Resulta razonable pensar que si se varía la separación entre las tiras metálicas, se producirá un cambio en el comportamiento de la respuesta en frecuencia de la superficie plana. En este apartado se va a estudiar qué ocurre si se produce dicha variación. El parámetro que se refiere a esta separación es el relacionado con la periodicidad, que tal y como se muestra en la Tabla 1 corresponde con p .

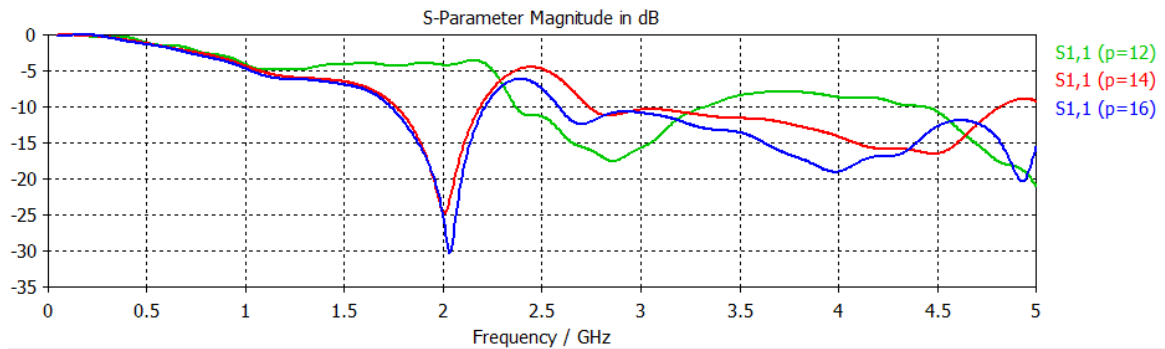


Figura 17. Parámetro S11 en función de la altura de la periodicidad p ($\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $s_{vía}=5\text{mm}$)

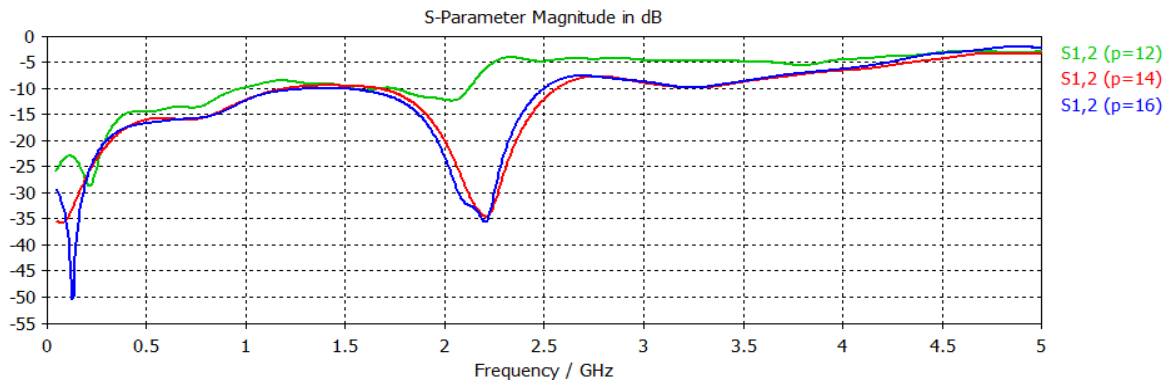


Figura 18. Parámetro S12 en función de la altura de la periodicidad p ($\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $s_{vía}=5\text{mm}$)

Si se estudia el resultado obtenido en las Figura 17 y Figura 18 se puede concluir que a medida que aumenta la distancia entre las tiras metálicas, el nivel de potencia transmitida disminuye. También hay que destacar que el ancho de banda se mantiene constante y la frecuencia de rechazo es directamente proporcional al parámetro p .

	p=12mm	p=14mm	p=16mm
Frecuencia de rechazo	2GHz	2.2GHz	2.2GHz
Nivel de potencia transmitida	-12.38dB	-34.5dB	-35.5dB
Ancho de banda eliminado	0.3GHz [1.8GHz-2.1GHz]	0.4GHz [1.95GHz-2.35GHz]	0.4GHz [1.9GHz-2.3GHz]
BW(%)	15%	18.2%	18.2%

Tabla 4. Variación numérica en función de la periodicidad p

Si observamos la tabla, cabe destacar el hecho de que apenas existe diferencia en los resultados obtenidos cuando $p=14\text{mm}$ y $p=16\text{mm}$. Puesto que, como se muestra en la Tabla 4, los valores numéricos son similares, en el resto de simulaciones se realizarán con $p=14\text{mm}$ porque el espacio ocupado es menor.

3.5 Comportamiento de la superficie variando la permitividad

Es intuitivo pensar que el hecho de variar la permitividad (ϵ_r) del sustrato en el que se encuentra la superficie plana puede suponer un cambio en su comportamiento. Tanto es así que si nos fijamos en el cálculo realizado en la Sección 3.2, se puede manifestar que la relación entre la permitividad y la frecuencia de rechazo son inversamente proporcionales. En las Figura 19 y Figura 20 se muestra el resultado de realizar una simulación con CST para comprobarlo, y no sólo eso, sino que enseñan si afecta a alguna otra propiedad.

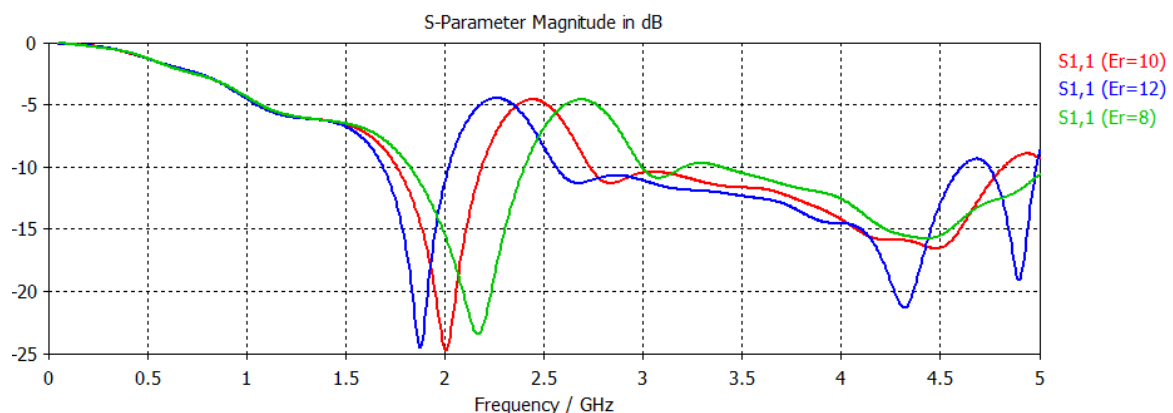


Figura 19. Parámetro S11 en función de la permitividad ϵ_r ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $s_{vía}=5\text{mm}$)

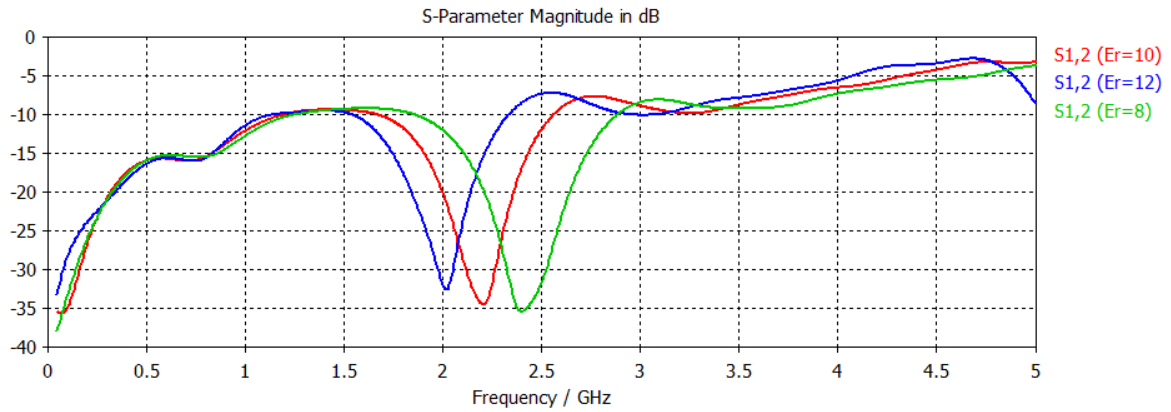


Figura 20. Parámetro S12 en función de la permitividad ϵ_r ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $rvia=0.5\text{mm}$, $svia=5\text{mm}$)

Si se analizan las Figura 19 y Figura 20, se deduce que a medida que aumenta la permitividad, disminuye la frecuencia de la banda prohibida. Este resultado tiene sentido ya que si se analiza la ecuación del cálculo de la frecuencia de trabajo se observa que ésta es inversamente proporcional a ϵ_r :

$$f = \frac{c}{4w\sqrt{\epsilon_r}}$$

Por otro lado, el ancho de banda y la caída de la banda prohibida se mantienen constantes cuando se modifica ϵ_r . Se pueden ver los valores numéricos exactos del modo en que afecta ϵ_r en la Tabla 5.

	$\epsilon_r=8$	$\epsilon_r=10$	$\epsilon_r=12$
Frecuencia de rechazo	2.4GHz	2.2GHz	2GHz
Nivel de potencia transmitida	-35.5dB	-34.5dB	-32.7dB
Ancho de banda eliminado	0.4GHz [2.2GHz-2.6GHz]	0.4GHz [1.9GHz-2.3GHz]	0.4GHz [1.8GHz-2.2GHz]
BW(%)	16.7%	18%	20%

Tabla 5. Variación numérica en función de la permitividad ϵ_r

3.6 Comportamiento de la superficie variando la altura de las vías

Puede resultar atractivo estudiar qué ocurre si se varía la altura de las vías que cortocircuitan las tiras metálicas al plano de masa, o lo que es lo mismo, el efecto de variar el grosor del sustrato dieléctrico. En este caso el parámetro afectado tiene como nomenclatura h_s .

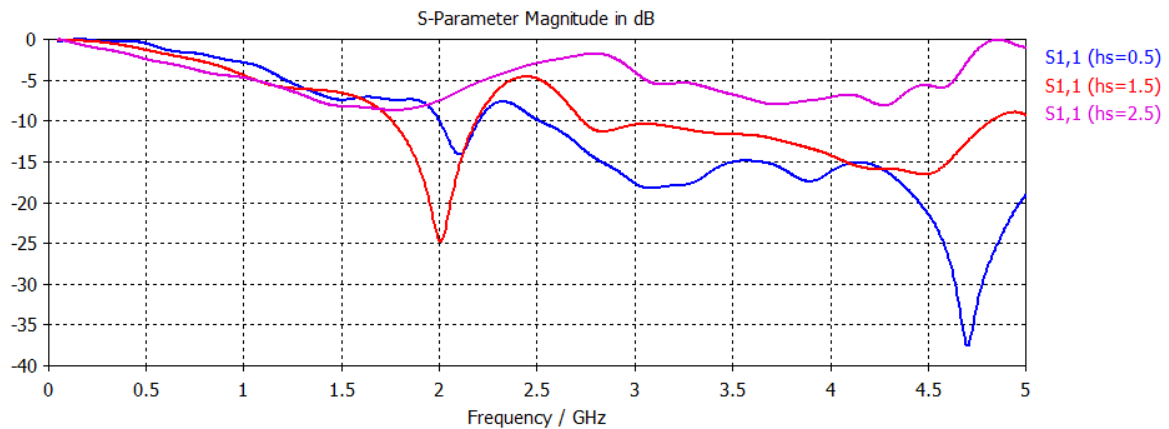


Figura 21. Parámetro S11 en función de la altura de la vía h_s ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)

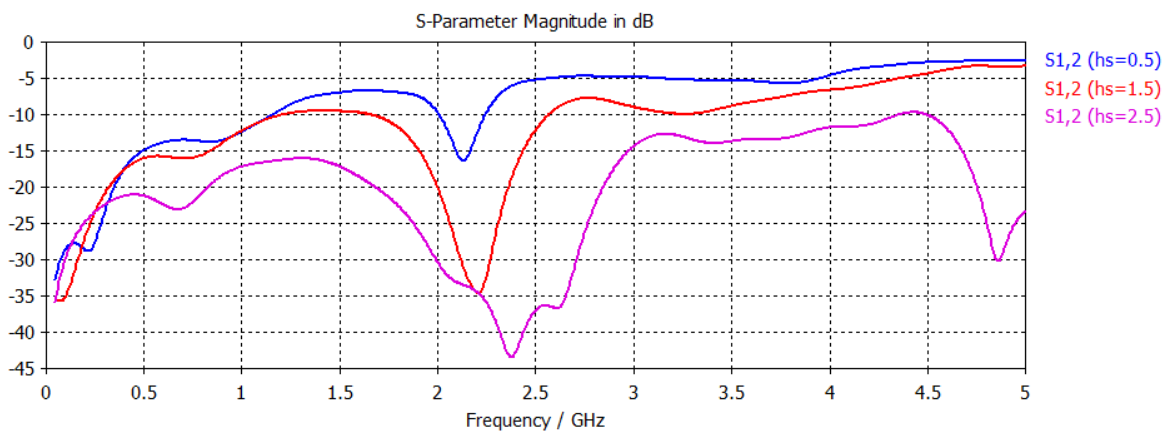


Figura 22. Parámetro S12 en función de la altura de la vía h_s ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $r_{vía}=0.5\text{mm}$, $svía=5\text{mm}$)

Se puede decir observando las Figura 21 y Figura 22 que si aumenta la altura de las vías metalizadas, también aumenta la frecuencia de rechazo. En los parámetros que se produce un cambio más notorio es en el nivel de potencia transmitida y en el ancho de banda eliminado, de manera que si aumenta h_s se produce un incremento bastante significativo de ambos. Estos cambios se resumen con valores numéricos en la Tabla 6.

	$h_s=0.5\text{mm}$	$h_s=1.5\text{mm}$	$h_s=2.5\text{mm}$
Frecuencia de rechazo	2.1GHz	2.2GHz	2.5GHz
Nivel de potencia transmitida	-16.28dB	-34.4dB	-43.4dB
Ancho de banda eliminado	0.2GHz [2GHz-2.2GHz]	0.4GHz [2GHz-2.4GHz]	0.6GHz [2GHz-2.6GHz]
BW(%)	9%	18%	22%

Tabla 6. Variación numérica en función de la altura de la vía h_s

3.7 Comportamiento de la superficie variando la separación entre las vías

Un parámetro de la superficie soft que resulta práctico estudiar es la separación entre las vías (según la Tabla 1 $s_{\text{vía}}$). El resultado del estudio es el que se muestra mediante los parámetros S de las Figura 23 y Figura 24.

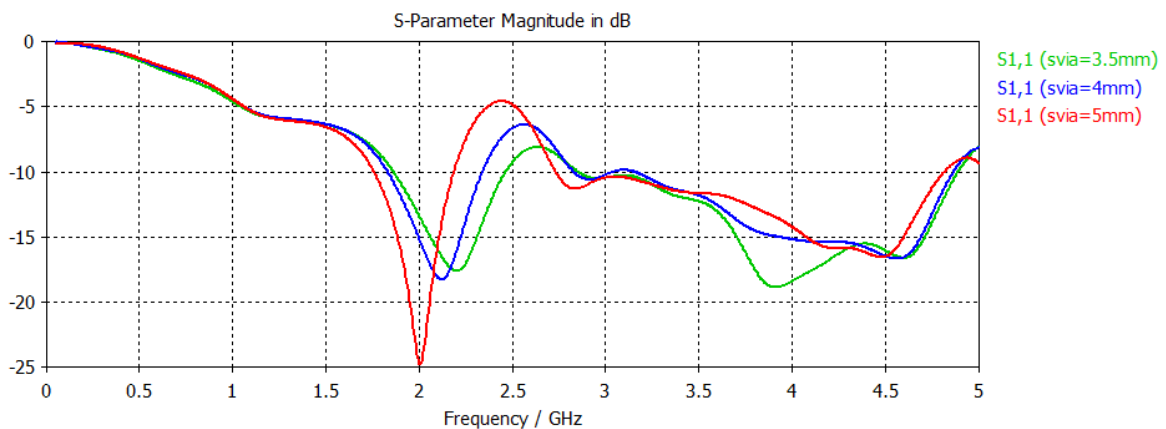


Figura 23. Parámetro S11 en función de la separación de las vías s_{via} ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{\text{via}}=0.5\text{mm}$)

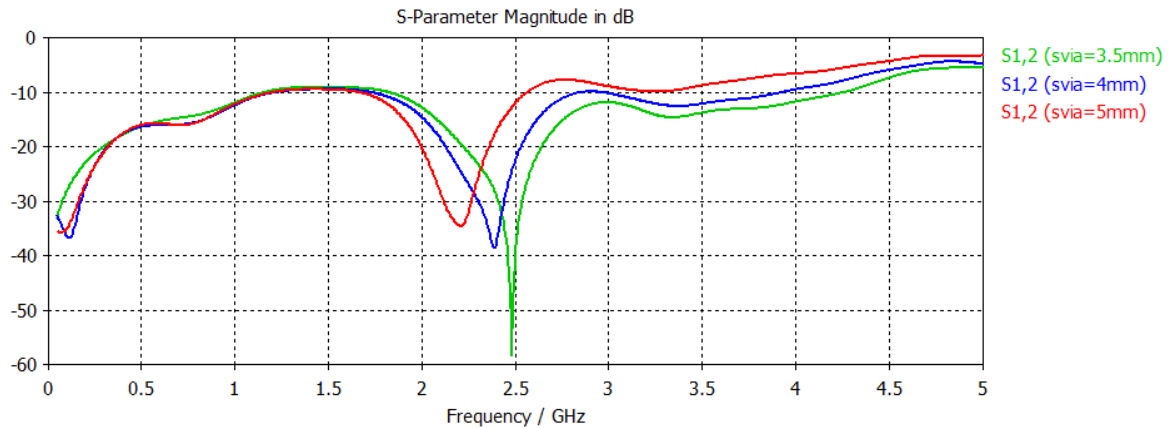


Figura 24. Parámetro S12 en función de la separación de las vías s_{via} ($p=14\text{mm}$, $\epsilon_r=10$, $w=12\text{mm}$, $h_s=1.5\text{mm}$, $r_{via}=0.5\text{mm}$)

Si se analizan las Figura 23 y Figura 24 se puede concluir que la separación entre las vías afecta a los tres parámetros principales de estudio. También se puede observar cuantitativamente cómo afecta en la Tabla 7. En resumen, a medida que disminuye la separación entre las vías disminuye la potencia transmitida, aumenta la frecuencia de rechazo y el ancho de banda eliminado se mantiene constante.

	$S_{via}=3.5\text{mm}$	$S_{via}=4\text{mm}$	$S_{via}=5\text{mm}$
Frecuencia de rechazo	2.5GHz	2.4GHz	2.2GHz
Nivel de potencia transmitida	-49dB	-38dB	-34dB
Ancho de banda eliminado	0.3GHz [2GHz-2.3GHz]	0.3GHz [2.2GHz-2.5GHz]	0.3GHz [2.3GHz-2.6GHz]
BW(%)	12%	12.5%	13%

Tabla 7. Variación numérica en función de la separación entre vías s_{via}

3.8 Resumen de los resultados obtenidos al estudiar la superficie soft

El estudio de la superficie realizado a lo largo de este capítulo sirve de especial utilidad si queremos variar de una forma rápida alguno de los parámetros de estudio. Es por ello que en la Tabla 8 se muestra con un vistazo rápido cómo y de qué manera se ven afectadas las propiedades de una superficie periódica cuando se ven sometidas a cambios en los valores de sus parámetros.

	Frecuencia de rechazo	Nivel de potencia transmitido	Ancho de banda eliminado
Ancho de la tira	Inversamente		
Separación entre las tiras		Inversamente	
Permitividad	Inversamente		
Altura de las vías	Directamente	Inversamente	Directamente
Separación entre las vías	Inversamente	Directamente	
Radio de la vía	Directamente		

Tabla 8. Resumen del modo en que afecta la modificación los parámetros a una superficie soft

Por tanto, si se analiza la Tabla 8 se puede concluir que:

1. En primer lugar, si se desea variar la frecuencia de rechazo de la superficie plana los parámetros que afectan de forma directa son la altura y el radio de las vías; mientras que el ancho de la tira, la permitividad y la separación entre las vías influyen inversamente. Por ejemplo, si se quiere aumentar la frecuencia de rechazo se puede disminuir el ancho de la tira o se puede aumentar la altura de las vías.
2. Para continuar, si el parámetro que se desea modificar el nivel de potencia transmitido el único parámetro que afecta directamente es la separación entre las vías; sin embargo, la separación y la altura de las vías influyen inversamente. Esto quiere decir que si quiero aumentar el nivel de potencia transmitido, basta con aumentar la separación entre las vías.
3. Además, si se está interesado en modificar el ancho de banda eliminado, únicamente afecta directamente el parámetro relacionado con la altura las vías. Esto es, si se desea aumentar el ancho de banda eliminado únicamente es necesario aumentar la altura de las vías metalizadas.
4. También se ha realizado un análisis igual que en el resto de parámetros para, en este caso, estudiar qué ocurre si se modifica el radio de la vía. Este parámetro apenas tiene repercusión sobre el ancho de banda eliminado y el nivel de potencia transmitida. Sin embargo, la frecuencia de rechazo si se ve afectada. De este modo, si aumenta el radio de la vía también lo hace la frecuencia de rechazo.

5. Por último, es necesario tener en cuenta que el hecho de modificar un parámetro puede repercutir no solo en el aspecto que queremos variar, sino en otros. Si se analiza la Tabla 8 un poco más en detalle, se puede afirmar que si se modifica la separación de las vías afecta a la frecuencia de rechazo, al nivel de potencia transmitido y al ancho de banda eliminado; esto quiere decir que se ven afectados los tres aspectos.

Capítulo 4

Aplicación de una superficie soft

Como ya se comentó en el Capítulo 1, uno de los problemas de la tecnología impresa reside en las ondas de superficie, este tipo de ondas provocan un acoplo de energía entre las antenas vecinas que se encuentren en el mismo sustrato. Este problema se tratará con más detalle a lo largo de este capítulo.

En este capítulo se explicará brevemente cuáles son los tipos de antenas, poniendo especial interés en la tecnología impresa. De ésta se mostrarán cuáles son los tipos de onda que aparecen en su configuración, cómo se pueden alimentar y qué características deben cumplir para ser correctamente diseñadas.

Además se muestra el diseño de una aplicación formada por un array de dos antenas impresas entre las que se coloca una superficie soft. Con este desarrollo se pretende mostrar una mejora en el acoplo mutuo de un array cuando se utiliza una superficie periódica plana entre dos parches.

4.1 Tipos de antenas

Una antena es un elemento cuya función es facilitar que las señales electromagnéticas que viajan dentro de la guía de onda, a la que está conectada, se radien hacia el espacio libre con la mayor eficiencia posible. Es decir, se puede ver una antena como un dispositivo encargado de acoplar la guía de onda y el espacio libre.

Existen diversos tipos de antenas y cada una de ellas con unas características diferentes [13]. A continuación se van a mostrar de algunas de ellas y posteriormente se tratará más en detalle las antenas de parche puesto que son las que interesan para este documento.

- Antenas de hilo. Las antenas de hilo son antenas cuyos elementos radiantes son conductores de hilo que tienen una sección despreciable respecto a la longitud de onda a la que trabajan. Estos hilos conductores soportan corrientes que dan lugar a los campos radiados. Algunos ejemplos son el monopolo vertical, el dipolo o la antena de espira.
- Antenas de apertura. Las antenas de apertura son aquellas que utilizan superficies o aperturas para direccionar el haz electromagnético de forma que concentran la emisión y recepción de su sistema radiante en una dirección. Este tipo de antenas suele estar alimentado por guías de onda. La más conocida y utilizada es la antena parabólica.
- Antenas de array. Las antenas de array están formadas por un conjunto de dos o más antenas idénticas distribuidas y ordenadas de forma que en su conjunto se comportan como una única antena con un diagrama de radiación propio. De esta forma se pueden conseguir características que no pueden ser logradas con un único elemento.

La característica principal de las antenas de array es que tienen un diagrama de radiación modificable, pudiendo ser adaptado a posibles necesidades. Esto se consigue de manera individual modificando la amplitud y la fase que alimenta a cada una de las antenas.

- Antenas microstrip. Son unas antenas resonantes impresas cuya forma y dimensiones se calculan para que el parche disipe su energía en forma de radiación. Está formada por un parche metálico de dimensiones comparables a la longitud de onda, un sustrato dieléctrico y un plano de masa. Existen varios tipos de antenas microstrip, pero la más común es la antena de parche.
Este es el tipo de antena que más interesa en este documento, ya que a lo largo de todo el texto se muestra cuáles son sus características y se intenta mejorar el acoplo mutuo que se produce cuando se utiliza un array de éstas.

4.2 Introducción a la tecnología microstrip

Las antenas de parche también son conocidas como antenas microstrip ya que es la tecnología en la que están basadas. Éstas son el resultado de una evolución que desde sus inicios estuvo regida por el principio de realizar diseños de dimensiones muy reducidas. Es por esto que su principal uso aparece en aplicaciones en las que es importante que las antenas empleadas tengan un tamaño pequeño, como por ejemplo en aeronáutica, aviación, dispositivos móviles o comunicaciones inalámbricas en general.

Algunas de las ventajas que este tipo de antenas puede ofrecer son la tendencia a la miniaturización debido al uso de componentes cada vez más pequeños y ligeros, la facilidad que ofrecen a la hora de integrarse tanto en superficies planas como otras que no lo sean o la facilidad que tienen para producirse en masa lo que hace que los costes se reduzcan bastante.

Aunque las ventajas son bastante favorables, también hay que tener en cuenta algunos inconvenientes a la hora de utilizar este tipo de antenas. Algunas de estas desventajas son la baja potencia de radiación debido a que por su estructura no pueden soportar altas potencias en sus componentes, la baja eficiencia o el estrecho ancho de banda que ofrece.

4.3 Tipos de ondas en la tecnología microstrip

Es importante conocer cuáles son los tipos de ondas que aparecen en este tipo de antenas y saber de qué forma afecta a su comportamiento. Existen cuatro tipos diferentes de ondas presentes en la tecnología microstrip: las ondas espaciales, las ondas de fuga, las ondas guiadas y las ondas de superficie [16]. Este estudio se centrará en estas últimas.

Como se ha mencionado anteriormente, el tipo de onda que más nos incumbe para este trabajo son las ondas de superficie ya que su existencia produce serios problemas en las antenas de parche. Es por eso que se va a intentar disminuirlas en la medida de lo posible.

Estas ondas están prácticamente confinadas dentro del dieléctrico, toman dirección descendente y cuando se encuentran con el plano de masa se reflejan, después al llegar a la entrecara del dieléctrico y el espacio libre se produce también una reflexión, de tal forma que las ondas permanecen viajando dentro del dieléctrico. Las ondas superficiales toman parte de la energía de la señal enviada incrementando las pérdidas y reduciendo la eficiencia.

Si las ondas confinadas en el dieléctrico alcanzan las fronteras de la estructura microstrip, la onda es difractada por los extremos del microstrip. Esta onda difractada altera los patrones de radiación aumentando los lóbulos laterales y el nivel de polarización cruzada.

Si existiera una antena cercana se puede producir acoplamiento, por lo que las ondas superficiales son bastante perjudiciales y se intenta disminuirlas. En este documento se intentarán disminuir utilizando una superficie soft periódica.

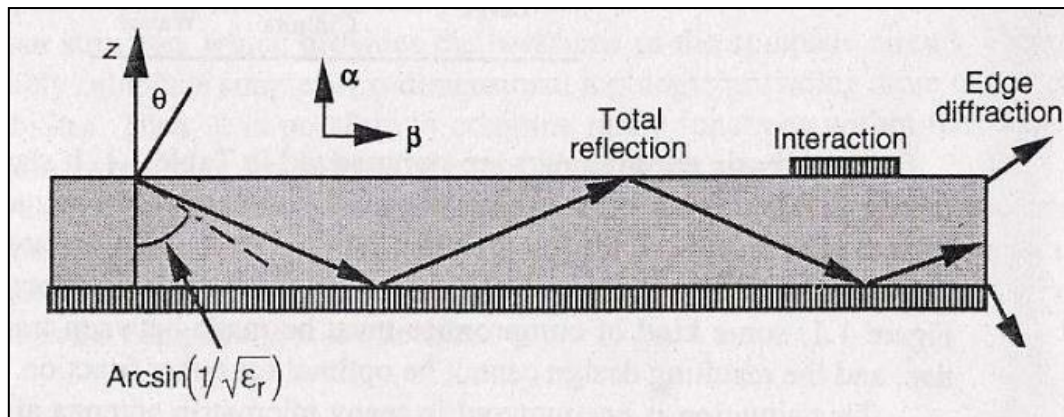


Figura 25. Recorrido de las ondas de superficie

4.4 Características de las antenas de parche

Dependiendo de las necesidades que requiera la aplicación para la que se vayan a usar las antenas de parche se pueden variar algunos parámetros (Tabla 9) para conseguir que un tipo de ondas (mencionadas en el Epígrafe 4.3) sea predominante y se logre el comportamiento deseado.

Para el caso de las antenas impresas [13] lo deseable es que predominen las ondas radiadas y no las ondas guiadas. Para lograrlo es necesario que el sustrato en el que se encuentra la antena sea grueso en comparación con la longitud de onda y la permitividad eléctrica sea baja.

Las antenas de tipo parche (Figura 26), basadas en la tecnología microstrip, poseen una tira conductora de largo L , ancho W y grosor t . La tira conductora se encuentra situada en la parte superior de un sustrato dieléctrico, el cual tiene un ancho h . En la parte inferior del sustrato dieléctrico se tiene un plano referenciado a masa.

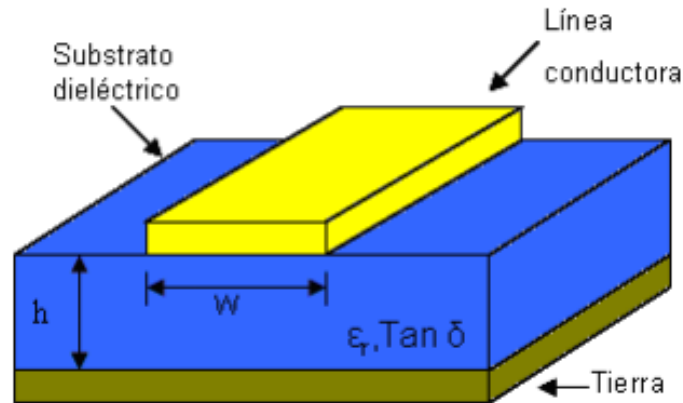


Figura 26. Estructura de una antena de parche

Existen unos rangos en las medidas y características que consiguen que se obtenga el resultado esperado de las antenas de parche. Para conseguir un buen diseño (Figura 26) los valores entre los que oscilan son los que se muestran a continuación:

- El valor de t , grosor del parche, debe ser muy delgado: $t \ll \lambda_0$ (λ_0 es la longitud de onda de la señal en espacio libre)
- El valor de L , largo del parche, puede variar dependiendo de la forma que tenga la antena de parche. Por ejemplo, para un parche rectangular el rango en el que oscila es de $\lambda_0/3 < L < \lambda_0/2$.
- El ancho del sustrato, o lo que es lo mismo h , debe ser grueso. Por lo general se puede considerar que $h \gg \lambda_0$.
- La permitividad eléctrica del dieléctrico, es decir ϵ_r , por lo general se encuentra dentro del rango $2.2 < \epsilon_r < 12$.

Otro parámetro de las antenas de parche es su diagrama de radiación (Figura 27). Su principal característica es que es omnidireccional, aunque idealmente la potencia radiada es emitida únicamente hacia la parte superior de la antena debido a que se considera un plano de masa infinito que bloquea la radiación hacia la parte inferior de la antena. En la realidad puede existir radiación hacia la parte inferior de la antena debido a que el plano de masa no es infinito, sin embargo, los lóbulos secundarios son de pequeñas dimensiones en comparación con el lóbulo principal.

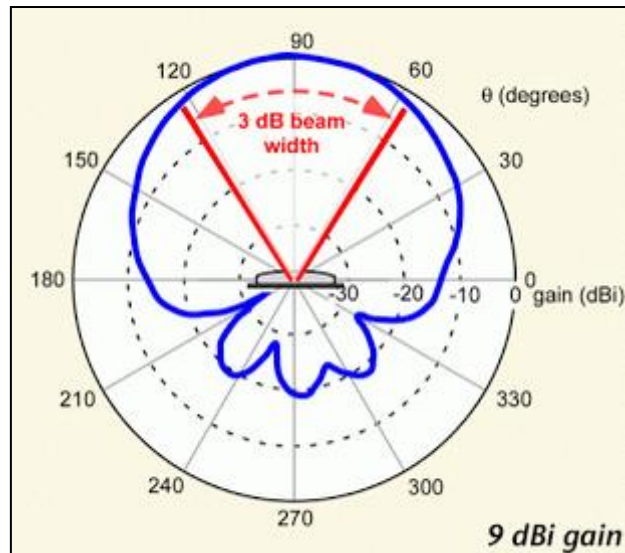


Figura 27. Diagrama de radiación de una antena de parche cuadrada

4.5 Tipos de alimentación de las antenas de parche

Un aspecto muy importante en el diseño de una antena es el esquema de alimentación que ésta puede tener, puesto que sin una estructura eficiente de alimentación las antenas microstrip no funcionarán correctamente a pesar de la precisión aplicada para su diseño.

Existen diversos métodos de alimentación [13] de una antena microstrip de manera que radie lo más eficientemente posible en las frecuencias deseadas mediante un adecuado acoplamiento de impedancias. En este documento nos vamos a centrar en cuatro de ellos: línea microstrip, sonda coaxial, acoplo por ranura radiante y acoplo por proximidad.

- Alimentación mediante línea microstrip

Este método consiste en alimentar a la antena conectando directamente una línea microstrip (diseñada para tener la impedancia característica deseada). Este método es el más sencillo de realizar, sin embargo es el que peor eficiencia presenta en relación al ancho de banda y el acoplo.

Principalmente existen dos formas de alimentar una antena mediante una línea microstrip:

- a) *Conectando directamente la línea microstrip en un borde de la antena.* En función de donde se coloque la línea de microstrip respecto del borde se obtendrá un mejor o peor acoplo de la antena (Figura 28a).
- b) *Alimentando la línea de microstrip por medio de intersecciones en la antena.* La profundidad de la inserción de la línea de microstrip es la que dicta el acoplo de la antena (Figura 28b).

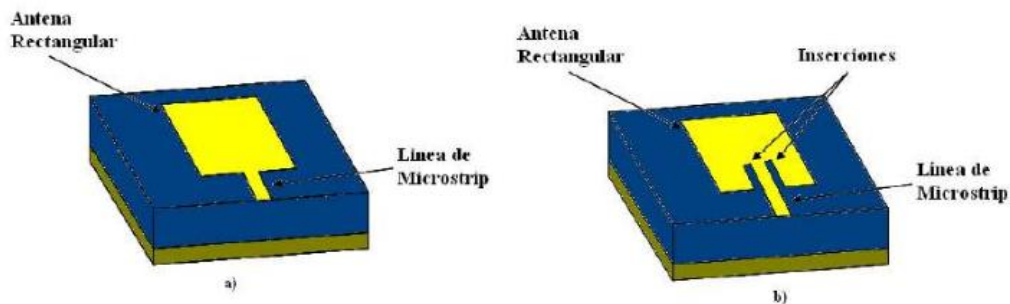


Figura 28. Alimentación mediante línea microstrip: a) Conexión directa de la línea microstrip a la antena y b) Conexión de la línea microstrip mediante intersecciones

- *Alimentación mediante sonda coaxial*

Es un método consistente en conseguir que el pin del cable coaxial alimente directamente al elemento radiante (en este caso la antena de parche), mientras que el otro extremo del cable coaxial esté conectado a la tierra de la antena de parche. La impedancia depende de la posición de la sonda en relación con la antena de tal forma que colocándola correctamente se generará un mejor acoplo.

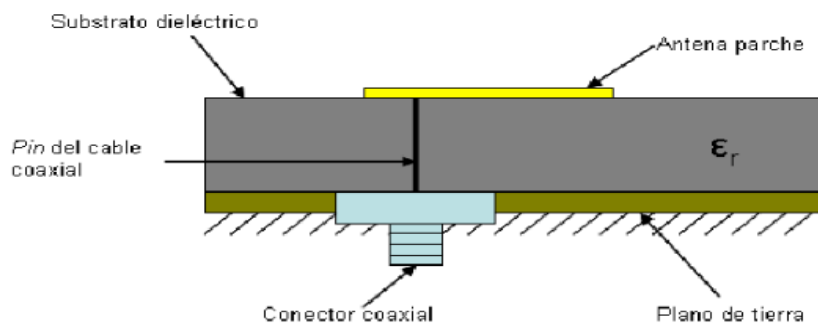


Figura 29. Alimentación por sonda coaxial

Es uno de los métodos más comunes de alimentación de antenas microstrip, esto se debe a que es sencillo de fabricar, además se adapta fácilmente y tiene una baja radiación indeseada.

- *Alimentación por acoplo por proximidad*

Este método de alimentación no tiene contacto directo con la antena, sino que el acoplo es electromagnético. En este caso el elemento radiante se encuentra sobre un sustrato dieléctrico y en la parte inferior de la estructura se tiene una línea de alimentación sobre otro sustrato dieléctrico con un plano a tierra.

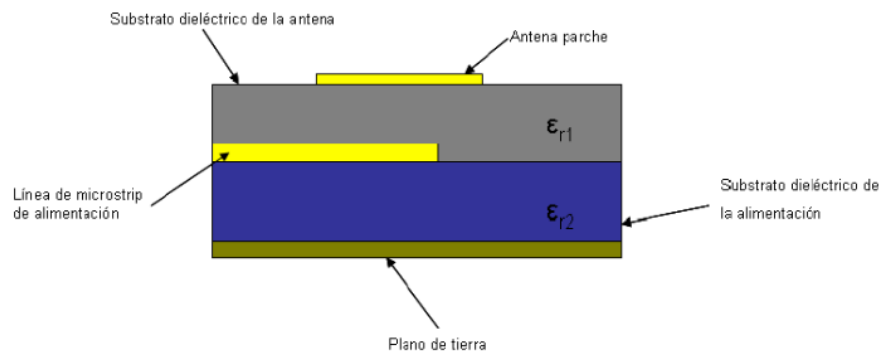


Figura 30. Acoplo por proximidad

Este método es el que presenta un mayor ancho de banda y tiene una menor radiación indeseable, aunque por el contrario su fabricación es compleja. Además tiene la ventaja de que la antena y la línea de alimentación pueden modelarse por separado cuando se utilizan dos capas de sustratos eléctricos.

- *Alimentación por acoplo por ranura radiante*

La alimentación por acoplo por ranura radiante tiene similitud con el de proximidad debido a que utiliza dos sustratos dieléctricos, uno para la antena radiante y otro para su alimentación.

La estructura de este método consiste en dos sustratos separados por un plano de masa. En la parte trasera del sustrato inferior hay una línea microstrip cuya energía llega al parche a través de la ranura que se encuentra en el plano de masa que separa los dos sustratos. El plano de masa tiene una apertura cuyas dimensiones y posición influyen en la impedancia y, por tanto, en el acoplo de la antena.

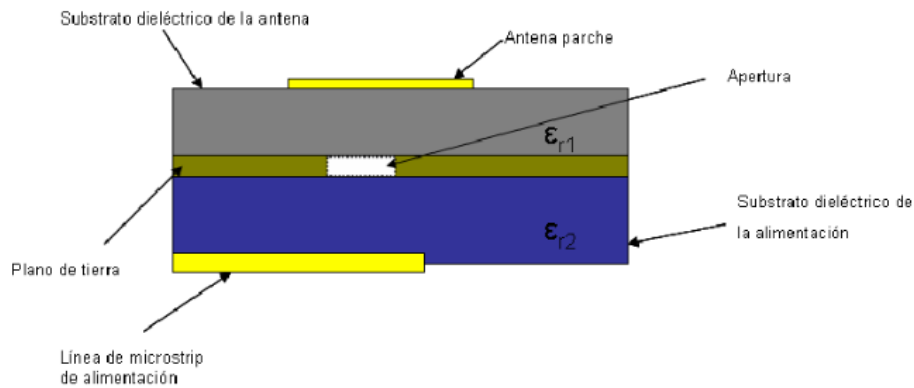


Figura 31. Acoplo por ranura radiante

Una ventaja respecto a la alimentación por proximidad es que en la alimentación por apertura, al estar la línea de alimentación en la parte inferior y separada de la antena por el plano de masa, la radiación de ésta es mínima en dirección de radiación de la antena con lo que se evita que haya interferencias y polarizaciones cruzadas. Por otro lado, algunos de los inconvenientes son que este es el método más complicado de fabricar de los cuatro que se presentan en este documento y que proporciona un ancho de banda bastante reducido.

4.6 Array de antenas de parche

Los arrays de antenas son una buena alternativa si queremos utilizar antenas de un tamaño reducido. Una de las principales ventajas de este tipo de antenas es que, al estar constituida por un conjunto de antenas independientes, se puede modificar fácilmente su diagrama de radiación variando únicamente la amplitud y fase de cada una de las antenas de forma independiente.

En el caso de este trabajo, para hacer el diseño de un array de antenas se van a utilizar parches cuadrados. Una de las propiedades de este tipo de antenas es que se excitan ondas de superficie sobre el sustrato en el que se encuentran impresas. Debido a esto se produce un acoplo de energía entre las antenas vecinas. Existen dos mecanismos por los que se puede producir este acoplo de energía. Uno de ellos se debe a que la radiación por espacio libre alcanza las antenas próximas. El otro motivo es causado por las ondas de superficie que de forma incontrolada viajan por el sustrato interfiriendo sobre el resto de antenas. Es evidente que este tipo de acoplos interfieren negativamente en el funcionamiento del array, es por eso que en este caso concreto, nos vamos a centrar en reducir este segundo tipo de acoplo y mediante una superficie soft reducirlo lo máximo posible.

Para realizar el diseño de este array de parches hay que tener en cuenta su adaptación, la frecuencia a la que trabaja y la variación del acoplo mutuo respecto a la distancia a la que están separadas las antenas.

En primer lugar lo se ha buscado es que el array estuviera adaptado, para ello el parámetro que afecta en mayor medida es la distancia de la alimentación al borde de la antena. De este modo, si nos fijamos en la Figura 32, se puede apreciar que cuanto más cerca esté la alimentación del borde de la antena, mejor es la adaptación obtenida.

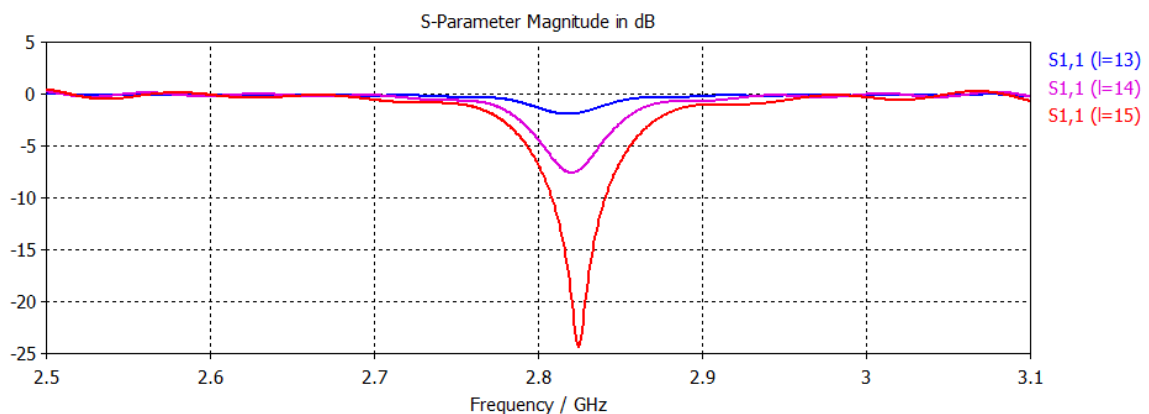


Figura 32. Adaptación de un array de dos parches cuadrados variando la posición de su alimentación

Por otro lado, hay que conseguir que el array de parches funcione a la misma frecuencia a la que lo hace la estructura soft periódica, es decir, a 2,8GHz. Para conseguir dicha frecuencia de trabajo se ha modificado el tamaño de los parches. En la Figura 33 se muestra cómo afecta la variación de este parámetro respecto a la frecuencia. De este modo, el tamaño que más se aproxima a 2,8GHz es 24mm.

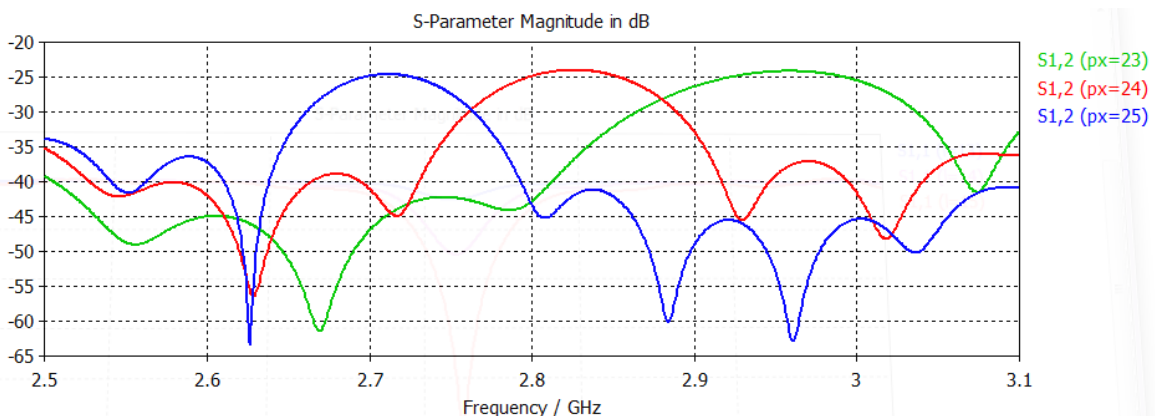


Figura 33. Frecuencia de trabajo de un array de dos parches respecto al tamaño de los parches

Por último se va a estudiar cómo varía el acoplo entre las dos antenas respecto a la distancia que las separa. En la Figura 34 se puede apreciar que cuanto más cerca están las antenas mayor es el acoplo entre ambas. Para nuestro caso particular, se ha elegido una distancia de 70mm porque es la menor separación entre las dos antenas para poder incorporar tres periodos de la superficie soft.

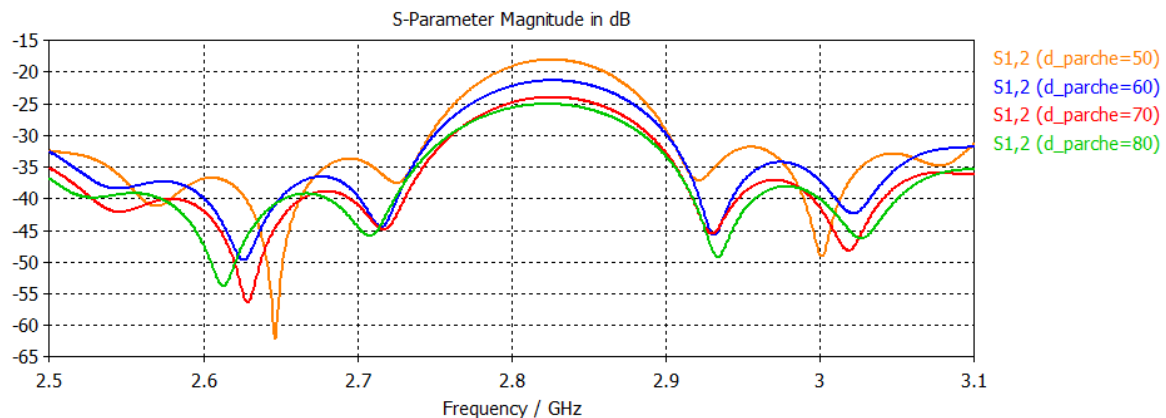


Figura 34. Nivel de acoplo mutuo entre dos antenas de parche respecto a la distancia que las separa

Debido a los estudios previos, mostrados en las Figura 32, Figura 33 y Figura 34, los valores elegidos para el array de dos antenas de parche son los que se muestran en la Tabla 9. Dichos valores se han elegido para posteriormente utilizar una superficie periódica entre las dos antenas y probar si realmente se reduce el acoplo mutuo.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALORES
P_x	Ancho y largo del parche	24 mm
d_{parche}	Distancia entre los parches	70 mm
ϵ_r	Permitividad del dieléctrico	4.4
l	Distancia de la alimentación al borde del parche	15 mm
m_x	Ancho del sustrato y del plano de masa	60 mm
m_y	Largo del sustrato y del plano de masa	150 mm
t	Grosor del plano de masa y de los parches	1.5 mm
h_s	Grosor sustrato	1.5 mm

Tabla 9. Descripción de los parámetros de un array de dos antenas de parche

Las antenas de parche elegidas (Figura 35) para el diseño son antenas cuadradas cuyo lado tiene una longitud de 24mm. La permitividad elegida para el sustrato es de 4.4 puesto que para que la antena funcione correctamente tiene que oscilar entre 2.2 y 12 (Epígrafe 4.4). Con este valor de permitividad se dispone de espacio suficiente para colocar una superficie soft con diferentes periodos pero sin que sea demasiado elevado para que afecte a la adaptación de las antenas. La separación entre las dos antenas de parche es de 70mm. Además la fuente de alimentación, consistente en dos sondas coaxiales, se coloca a 15mm del borde de la antena de parche para conseguir que funcione a la misma frecuencia que la estructura periódica, es decir, a 2.8GHz.

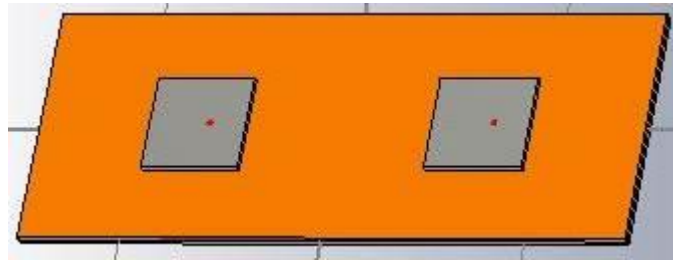


Figura 35. Array de dos antenas de parche

4.7 Aplicación de una estructura soft a un array de antenas de parche

En este epígrafe se va a estudiar la aplicación de una superficie soft plana a un array de dos parches para reducir el acoplo mutuo. Ya se ha visto (Capítulo 3) que estas estructuras periódicas tienen la capacidad de eliminar ondas de superficie que viajan por el sustrato en el que se encuentran las antenas. Esta propiedad es válida si su orientación es la adecuada, es por ello que la superficie soft se colocará perpendicular a la dirección en la que se quiere reducir el acoplo.

Debido a que estas estructuras son lo suficientemente pequeñas, se pueden colocar varios periodos de éstas entre las antenas. En este caso concreto (Figura 36), puesto que los parches están separados una distancia de 70 mm y la configuración de las tiras es la utilizada en el Capítulo 3, el máximo número de periodos que se pueden utilizar es de tres.

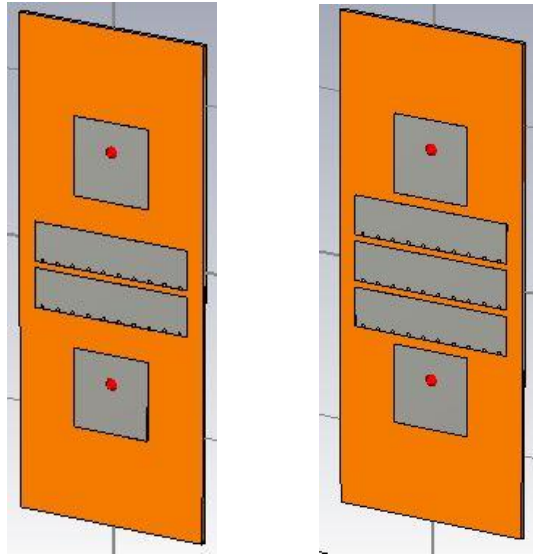


Figura 36. Array de dos parches con estructura soft de dos y tres tiras

Es interesante saber, y más adelante se demostrará, que el número de tiras existentes entre las dos antenas afecta al acoplo mutuo de ambas. Esto es, si se colocan más periodos entre las antenas, se producirá una reducción del acoplo mutuo.

El estudio se va a realizar mediante el análisis de parámetros S para ver cuál es el efecto de colocar la estructura periódica. Para ello se va a comparar el acoplo mutuo producido sin estructura soft, con una estructura periódica de dos tiras y con una estructura periódica de tres tiras.

Para este estudio las medidas tanto del array de antenas como de la estructura soft son las mencionadas en los Capítulos 3 y 4 respectivamente.

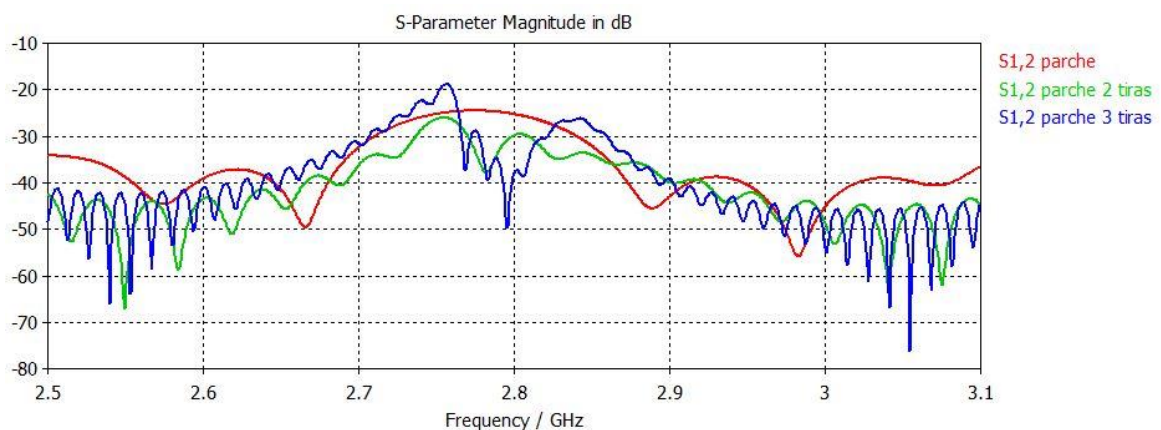


Figura 37. Parámetros de acoplo mutuo simulados para un array y un array con dos y tres tiras

En la Figura 37 se muestra el resultado de una simulación realizada para comparar el acoplo existente entre dos antenas de parche y las mismas antenas con una superficie soft de dos y tres tiras entre ellas.

Lo primero que se puede afirmar es que el ancho de banda es estrecho debido a las características del sustrato elegido (grosor y constante dieléctrica). Además, para la frecuencia de trabajo, es decir alrededor de los 2.8GHz, el nivel de acoplo inicial sin colocar la estructura periódica está cerca de los -25 dB. Pero si se incorporan las corrugaciones planas este valor de acoplo se reduce a -30 dB y -40 dB para el caso de dos y tres tiras respectivamente. Es decir, el acoplo mutuo disminuye entre 5 y 15 dB.

De todo esto se puede afirmar, como ya se mencionó anteriormente, que si se aumenta el número de periodos de la corrugación plana, el acoplo mutuo disminuye en mayor medida.

4.8 Comparativa de los diagramas de radiación

Es lógico pensar que el hecho de utilizar una estructura soft periódica podría provocar efectos no deseados sobre los diagramas de los elementos del array. Lo que deseamos es que el hecho de utilizar una estructura periódica no afecte al diagrama de radiación de nuestro array, puesto que de lo contrario influye en el funcionamiento de nuestra antena.

Con este propósito se han simulado diagramas de radiación para diversos casos. El estudio se va a realizar desde dos enfoques distintos:

- Estudio del comportamiento del diagrama de radiación para cada una de las estructuras. Es decir, para cada una de las estructuras analizadas en este documento (array de antenas de parche sin y con superficie soft) se va a mostrar su diagrama de radiación.
- El estudio del comportamiento del diagrama de radiación para diversas frecuencias en una misma estructura. O lo que es lo mismo, se mostrará el diagrama de radiación para ver si mantiene su comportamiento en frecuencia.

El estudio del diagrama de radiación de una antena se va a analizar en diferentes planos. Los planos más típicos para su análisis son el plano E (es el definido por la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección) y el plano H (lo forma la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección). Ambos planos son perpendiculares entre sí y su intersección determina la dirección de

máxima radiación de la antena. En este caso particular el plano E es el que corresponde al plano YZ, mientras que el plano H corresponde al plano XZ.

Comparativa del diagrama de radiación para diversas estructuras

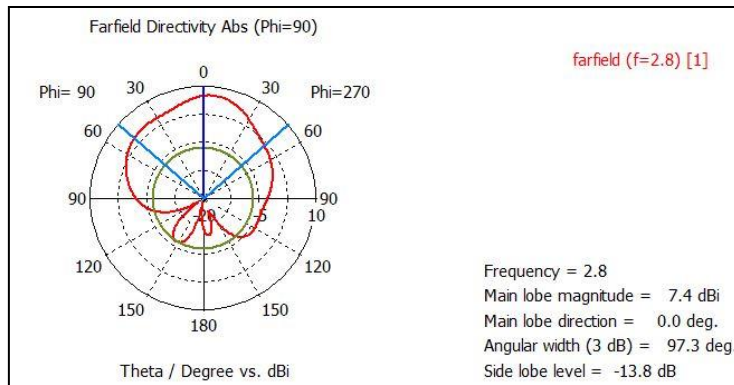
Lo primero que podemos pensar es que el hecho de incorporar una corrugación plana puede afectar al funcionamiento del array de antenas. Es por ello que en este primer caso se va a realizar una comparativa de cómo se ve afectado el diagrama de radiación de un array de dos parches sin utilizar una estructura periódica y si se utiliza una estructura periódica de dos y tres elementos.

Para realizar esta comparativa se han realizado varias simulaciones a través del CST, las cuales representan el diagrama de radiación para la frecuencia a la que trabaja el array de antenas, es decir, a 2.8GHz.

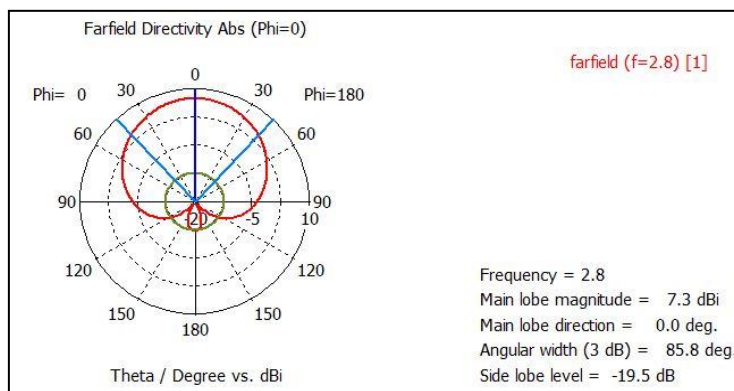
Además se va a estudiar para tres planos diferentes, esto es, para valores diferentes de ϕ . Cada uno de esos ángulos son $\phi=0^\circ$ (correspondiente al plano XZ o plano H), $\phi=90^\circ$ (correspondiente al plano YZ o plano E) y un ángulo intermedio $\phi=45^\circ$.

Si analizamos las Figura 38, Figura 39 y Figura 40 para cada uno de los valores de ϕ el diagrama de radiación se mantiene prácticamente constante para los tres casos, es decir, tiene un efecto casi despreciable. Este resultado es el idóneo puesto que al no variar, se pueden utilizar las estructuras soft sin que afecte al comportamiento y funcionalidad de la antena que estamos usando consiguiendo únicamente reducir el acoplo mutuo.

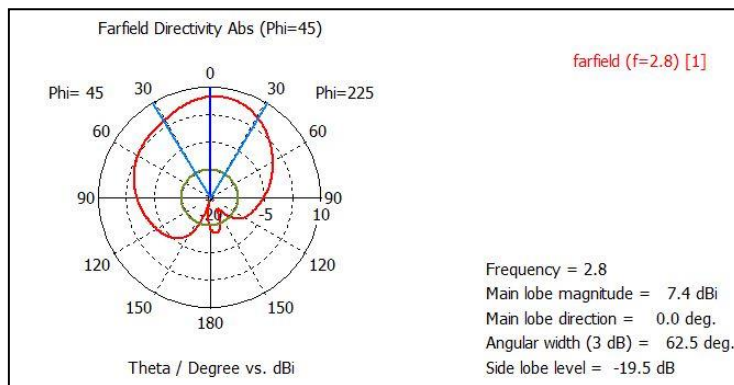
Podemos decir, por tanto, que el uso de estructuras periódicas entre dos antenas de parche no afecta al comportamiento del array pero si consigue disminuir el acoplo mutuo.



a) Diagrama de radiación para el plano E

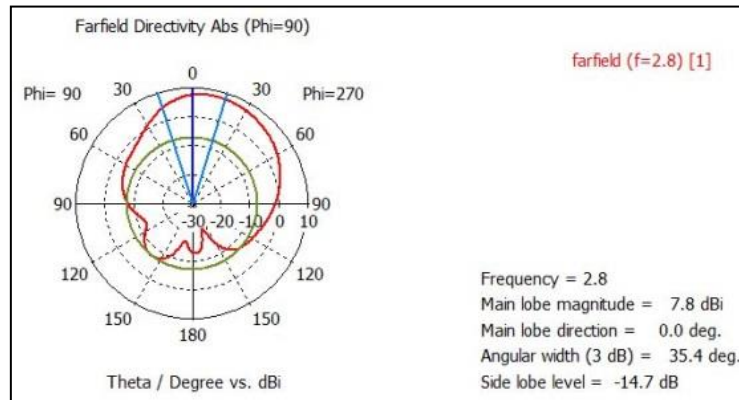


b) Diagrama de radiación para el plano H

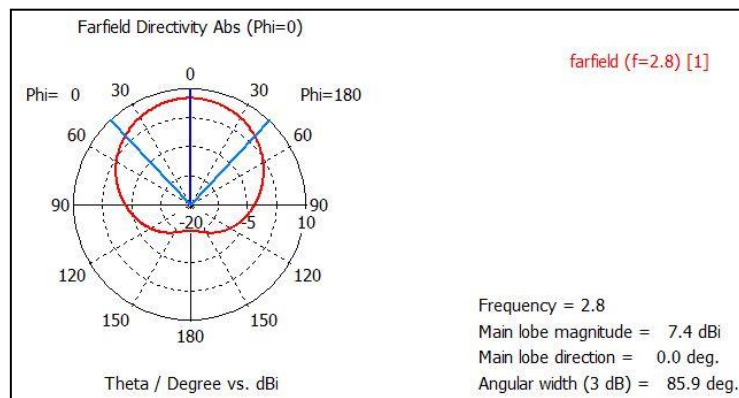


c) Diagrama de radiación para un plano intermedio

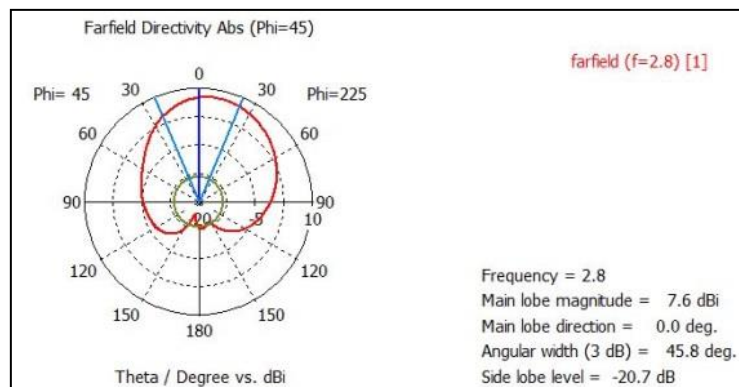
Figura 38. Diagrama de radiación del array de antenas sin estructura periódica



a) Diagrama de radiación para el plano E

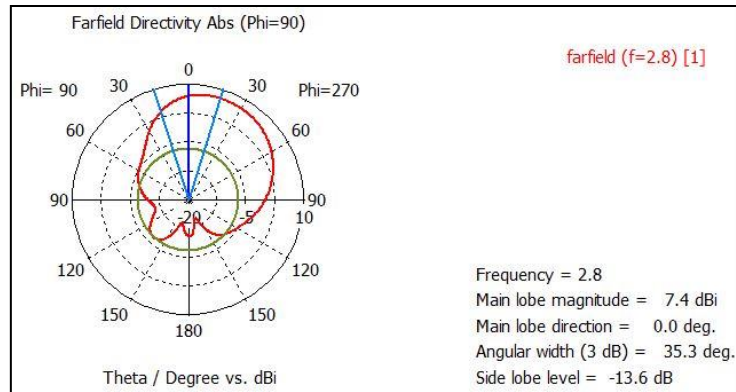


b) Diagrama de radiación para el plano H

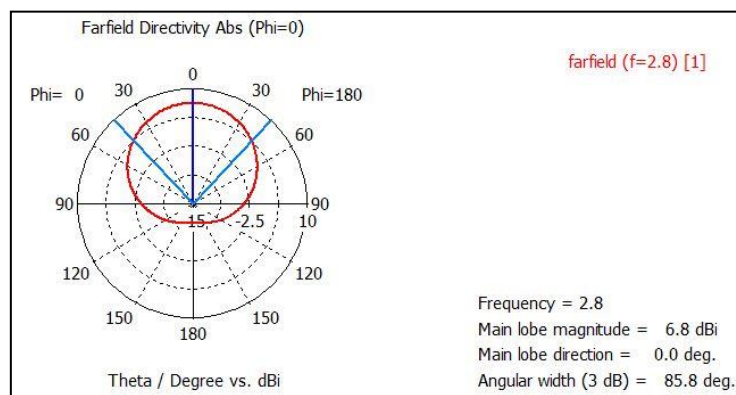


c) Diagrama de radiación para un plano intermedio

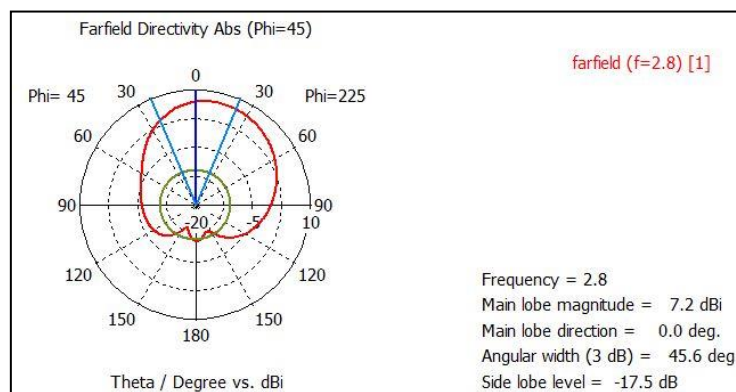
Figura 39. Diagrama de radiación del array de antenas con dos elementos



a) Diagrama de radiación para el plano E



b) Diagrama de radiación para el plano H



c) Diagrama de radiación para un plano intermedio

Figura 40. Diagrama de radiación del array de antenas con tres elementos

Comparativa del diagrama de radiación para diversas frecuencias

También resulta llamativo comprobar que el uso de una estructura soft no afecta al comportamiento de su diagrama de radiación. Es por ello que en ese apartado se va a estudiar el resultado de varias simulaciones en las que se muestra una comparativa del diagrama de radiación comprobando cual el su funcionamiento para diversas frecuencias y para una misma estructura.

En este caso concreto se va realizar un estudio comparando un array de dos parches y un array de dos parches con una superficie soft de dos y tres elementos. Las simulaciones mostradas corresponden con el plano E ($\phi=90^\circ$). Además, las frecuencias para las que se va a realizar este estudio son las siguientes: 2.6GHZ, 2.7GHZ y 2.8GHZ.

En primer lugar se va a mostrar el resultado de estudiar los diagramas de radiación de un array de dos antenas de parche simulados a las tres frecuencias anteriores. En la Figura 41 se puede observar que para las tres frecuencias elegidas el diagrama de radiación en el plano E no sufre prácticamente ninguna variación. Este resultado es positivo puesto que el diagrama de radiación permanece estable en frecuencia, pudiendo así mantener su funcionalidad en varias frecuencias.

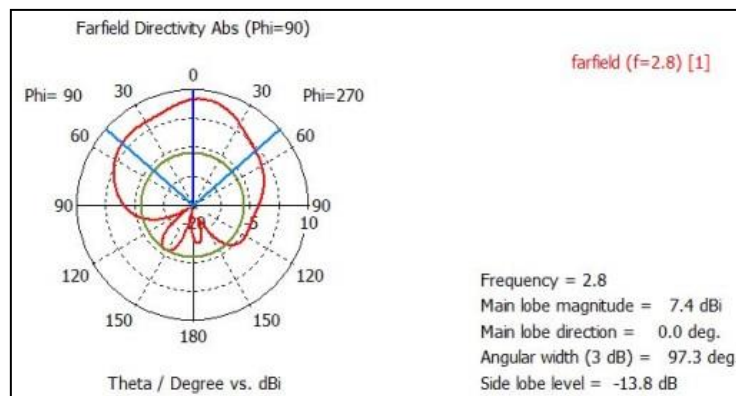
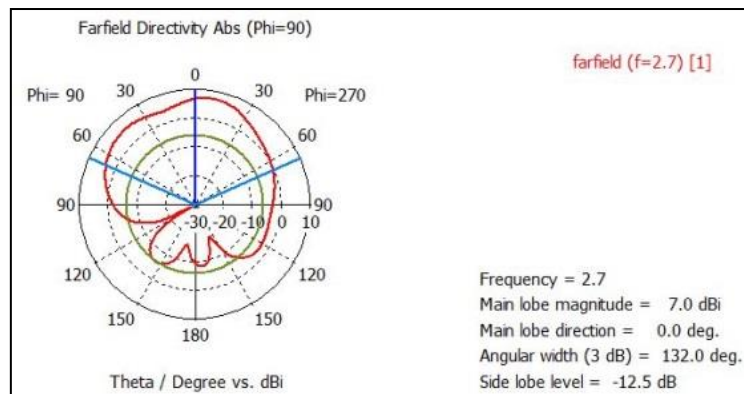
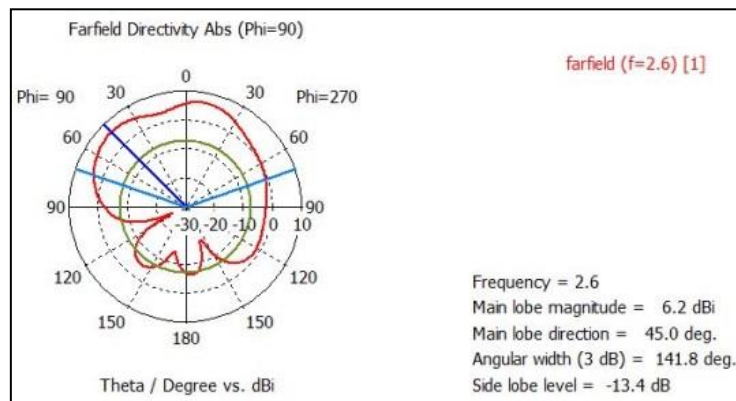


Figura 41. Variación en frecuencia del diagrama de radiación en el plano E para un array de dos parches

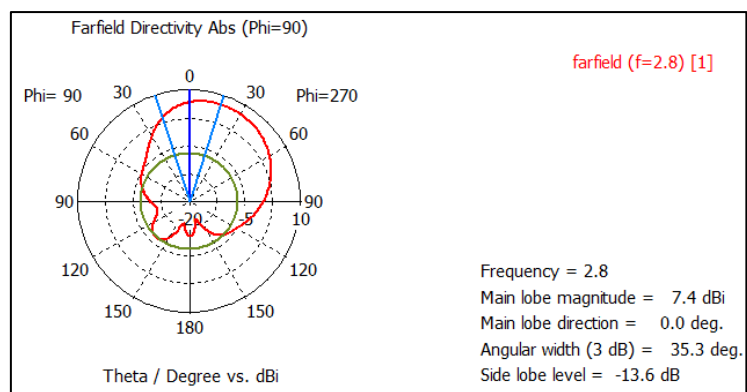
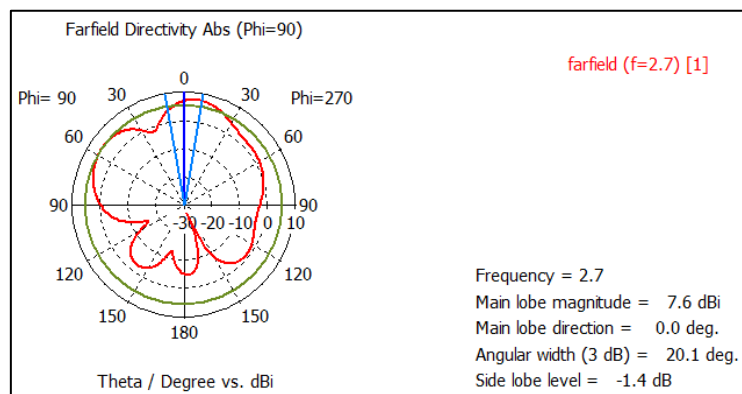
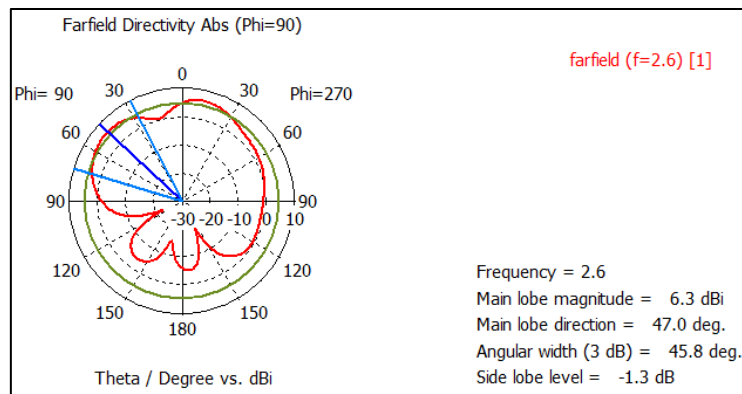


Figura 43. Variación en frecuencia del diagrama de radiación en el plano E para un array de dos parches con tres elementos

En las Figura 42 y Figura 43 se puede observar el resultado de realizar una comparación del diagrama de radiación para las tres frecuencias elegidas para un array de dos parches con dos y tres tiras planas respectivamente entre ellos. Se puede apreciar que el diagrama de radiación se mantiene prácticamente constante cuando usamos una estructura plana periódica, es decir, sigue siendo broadside. Esto es positivo puesto que el diagrama de radiación permanece estable en frecuencia si se utiliza una corrugación plana, pudiendo así ofrecer la misma funcionalidad en varias frecuencias.

De este estudio se puede concluir que el uso de una estructura soft entre dos antenas de parche no influye en su comportamiento en frecuencia, por lo que al usar una estructura periódica podemos mantener la funcionalidad del array disminuyendo el acoplo mutuo.

4.9 Comparativa del campo eléctrico

En último lugar, se va a demostrar cómo afecta una corrugación plana a un array mediante su campo eléctrico. En este estudio se van a mostrar unas imágenes del campo eléctrico que genera un array de dos antenas de parche y se va a comparar con el campo que se genera cuando se utiliza una estructura con dos y tres periodos.

Teóricamente, al colocar una superficie periódica entre dos antenas de parche el campo eléctrico que se genera entre ambas debe disminuir, es más, cuando se aumenta el número de tiras metálicas esa variación debe ser aún mayor.

Para nuestro estudio se va a analizar el plano ZY puesto que el campo se encuentra en el plano perpendicular a la superficie donde se encuentran impresas las antenas.

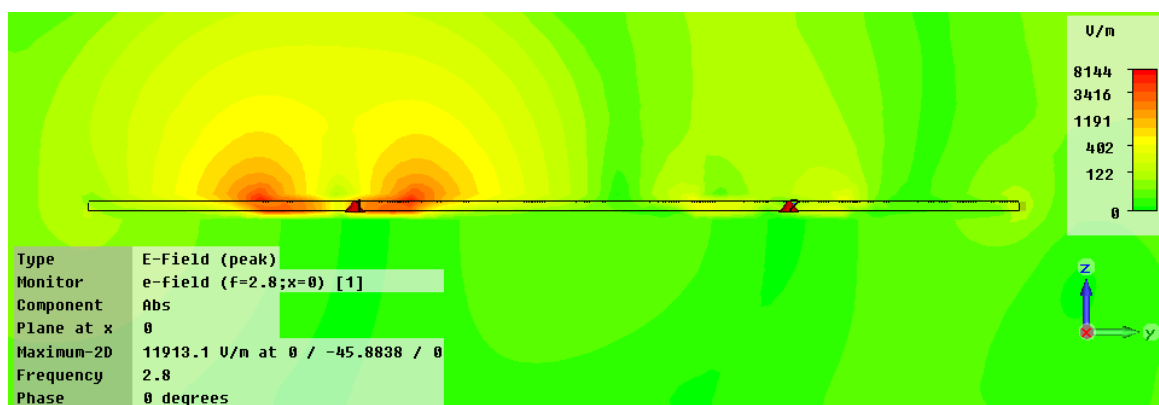


Figura 44. Campo eléctrico para un array de dos antenas de parche

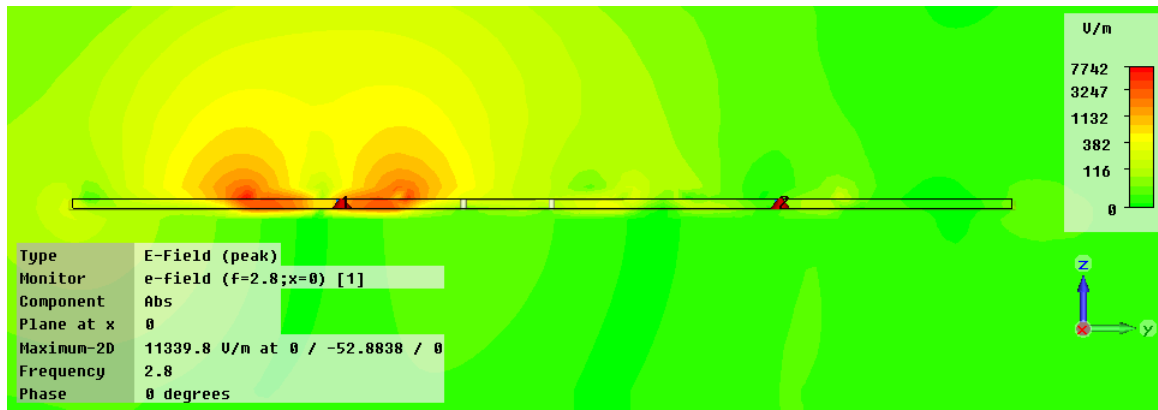


Figura 45. Campo eléctrico para un array de dos antenas de parche con dos elementos

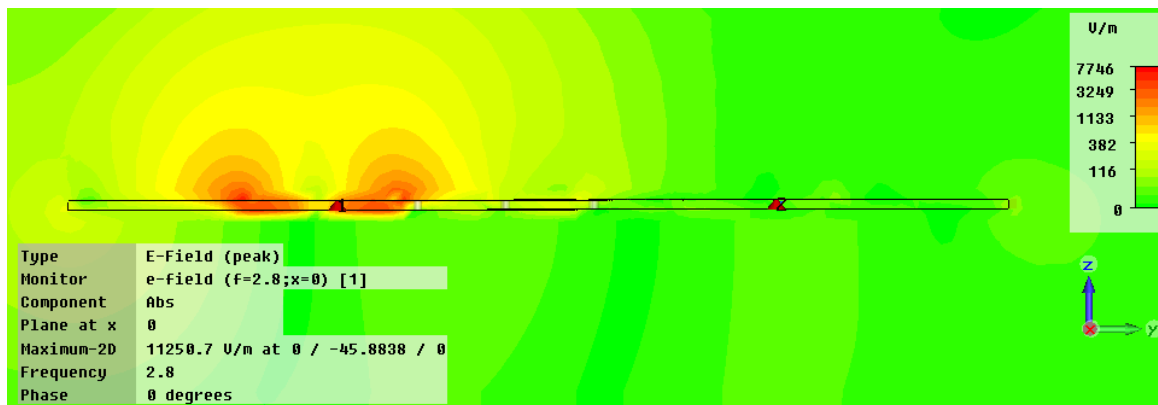


Figura 46. Campo eléctrico para un array de dos antenas de parche con tres elementos

Observando las Figura 44, Figura 45 y Figura 46 se puede concluir que si no colocamos una superficie soft entre dos antenas impresas el campo eléctrico afecta bastante a la antena adyacente. Si por el contrario, se coloca una superficie periódica el campo eléctrico afecta en menor medida a la antena colindante. Pero no sólo eso, sino que si aumenta el número de elementos, el campo eléctrico afecta menos a la otra antena que forma el array. Al afectar en menor medida el campo eléctrico se produce una reducción del acoplo mutuo.

Por tanto, este resultado coincide con los resultados obtenidos en apartados anteriores:

- En el Capítulo 3 se demostró, mediante parámetros S, cuando se utiliza una corrugación plana entre dos antenas de parche el acoplo mutuo se reduce.
- En el Epígrafe 4.8 se comprobó que el uso de una superficie soft no produce prácticamente variación en su diagrama de radiación, por lo que se demostró que su uso no afecta al funcionamiento de la misma.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

5.1 Conclusiones

A lo largo de este trabajo se ha analizado la capacidad que tienen las superficies soft periódicas para lograr disminuir ondas superficiales generadas por antenas de parche. Para poder demostrarlo se ha trabajado con dos tipos de superficies planas: antenas de parche impresas y superficies soft. El estudio ha consistido en analizar la capacidad que tiene una estructura periódica para reducir el acoplo mutuo cuando se trabaja con un array de antenas impresas.

En primer lugar se ha realizado un análisis de una estructura soft periódica compuesta por cinco tiras metálicas. Para ello se han utilizado dos puertos de guía de onda a los extremos del sustrato donde se encuentra la estructura y, mediante los parámetros S , se ha demostrado cómo afecta la variación de algunos parámetros de la misma. Los parámetros usados para estudiar la superficie han sido el ancho y la separación de las tiras; la separación, altura y separación de las vías; y por último, la permitividad del sustrato. Se ha demostrado por ejemplo que:

- La frecuencia a la que trabaja la superficie se ve afectada por el ancho de las tiras; la altura y la separación de las vías; y la permitividad. La relación entre la altura y el radio de las vías es directamente proporcional a la frecuencia de rechazo. Sin embargo, el ancho de las tiras, la permitividad y la separación entre las vías es inversamente proporcional.
- El nivel de potencia transmitido cambia y se varían la separación de las tiras y la altura y separación de las vías. De este modo, si aumenta la separación entre las vías, se incrementa el nivel de potencia transmitido. Mientras que, si aumenta la separación entre las tiras o la altura de las tiras, el nivel de potencia transmitido se reduce.
- El ancho de banda se modifica cuando la altura de las vías lo hace. Es decir, si aumenta la altura de las vías, también aumenta el ancho de banda eliminado.

La segunda parte del estudio consiste en utilizar este tipo de estructuras para minimizar el acoplo mutuo de dos antenas de parche causado por las ondas superficiales que viajan por la superficie en la que se encuentran.

En este caso, en primer lugar se estudia de manera individual un array de dos antenas de parche impresas. Se hace el diseño para que posteriormente se pueda acoplar una superficie soft entre las dos antenas. Se colocan dos y tres periodos de ésta y después se hace un estudio. En éste se muestra una comparativa del acoplo mutuo existente en el array cuando no se usa la estructura periódica y cuando se utiliza colocando dos y tres periodos.

Este estudio se realizó desde tres puntos de vista los cuales coinciden con el resultado. Cada uno de ellos y lo que se concluye se explica a continuación:

- En el primero se realiza utilizando los parámetros S. Gracias a ellos se puede realizar una comparación del acoplo mutuo existente. De este estudio se concluye que si se utiliza una superficie soft se reduce el acoplo.
De forma cuantitativa, cuando la estructura soft consta de dos tiras metálicas la reducción del acoplo está en torno a los 5dB. Mientras que cuando la superficie periódica está formada por tres tiras, el acoplo se reduce 15dB. Es decir, si aumenta el número de periodos entre las dos antenas, el acoplo mutuo es menor.
- El otro estudio se realiza desde el punto de vista del diagrama de radiación. De él se puede afirmar que cuando se utiliza una superficie periódica plana el diagrama de radiación prácticamente no se ve afectado, por lo que no se altera el funcionamiento del array de parches.

- Por último, se hace una comparación del campo eléctrico simulado. En este estudio se muestra que la cantidad de energía eléctrica que llega a la antena adyacente es menor cuando se utiliza una superficie soft, reduciendo por tanto el acoplo mutuo en mayor grado cuantas más tiras se utilicen.

5.2 Líneas futuras

La tecnología impresa es una de las más utilizadas en la actualidad. Es por ello que se espera que siga una evolución bastante significativa en los próximos años. Algunas de las futuras líneas de investigación son las que se muestran a continuación:

- Utilizar superficies soft para reducir en la medida de lo posible las ondas de superficie que generan las antenas impresas en otras direcciones. Con esto, se consigue no solo disminuir el acoplo mutuo, sino también lograr atenuar la radiación trasera que tienen este tipo de antenas para que la radiación no esté en contacto tan directo con el cuerpo de las personas.
- Se pueden realizar modificaciones sobre la estructura plana periódica para lograr diversos efectos. Algunas de estas modificaciones son cambiar la posición de las vías metalizadas colocándolas, por ejemplo, centradas o variar la separación de las vías.
- Se han realizado modificaciones sobre la forma de las tiras metálicas para lograr que estas sean más pequeñas y puedan ser utilizadas en dispositivos en los que es fundamental su tamaño [15][4]. Un ejemplo de este tipo de geometrías consiste en replegar las tiras sobre sí mismas consiguiendo formas que se van enrollando. Con esta modificación se logra una miniaturización manteniendo los beneficios de la superficie con tiras rectas. Estas superficies se podrían analizar realizando simulaciones mediante el CST e incluso fabricarlas y realizar mediciones experimentales.
- Si se está interesado en que la superficie soft trabaje en varias frecuencias, se puede realizar una modificación que consiste en que cada tira metálica tenga las vías situadas en un lateral. De este modo se intercalan tiras con las vías en la derecha y en la izquierda consiguiendo dos frecuencias de trabajo diferentes.

- Se puede enfocar el estudio a lograr que este tipo de estructuras puedan ser empleadas utilizando materiales textiles para, por ejemplo, reducir la radiación trasera. Se podrían utilizar tanto las superficies analizadas en este documento como geometrías replegadas sobre sí mismas para que su tamaño sea menor.

Con este uso es necesario estudiar cómo se comportan cuando se deforman debido a estar integradas en prendas de diversos usuarios. Por tanto su análisis ha de realizarse sobre superficies con distintos radios de curvatura para observar su funcionamiento.

Referencias

- [1] Balanis, C.; “Antenna Theory. Analysis and design”; [Libro]; John Wiley & Sons, 1996
- [2] E. Rajo-Iglesias, O. Quevedo-Teruel y L. Inclán-Sánchez; “Planar soft surfaces and their application to mutual coupling reduction”; [Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 57(12): 3852 _3859, dec. 2009].
- [3] E. Rajo-Iglesias, M. Caiazzo, L. Inclán-Sánchez y P. S. Kildal; “Comparison of bandgaps of mushroom-type EBG surface and corrugated and striptype soft surfaces”; [IET Microwaves, Antennas and Propagation. Special Issue on Metamaterials EBG, 1(1): 184_189, Feb 2007].
- [4] L. Inclán-Sánchez, J.L. Vázquez-Roy, E. Rajo-Iglesias y E. García-Munoz; “Compact EBG surface based on capacitively loaded loop resonators with grounded vias”; [Antennas and Propagation, European Conference on 2007. EuCAP 2007, 1: 226_228, 11-16 Nov 2007].
- [5] “CST”; [Página web de la aplicación CST]; Disponible en:
<https://www.cst.com/>
- [6] de Inclán Sánchez L.; “Contribución al diseño de Antenas de Parche Multicapa basadas en la integración de Elementos Periódicos Metálicos”; [Tesis Doctoral de la Universidad Carlos III de Madrid, 2008].
- [7] de Inclán Sánchez L.; “Análisis de superficies soft planas y su aplicación a las antenas de parche”; [Trabajo de Investigación de la Universidad Carlos III de Madrid, 2012].
- [8] Hernández Aquino, R.; “Diseño, simulación y construcción de antenas tipo parche para bluetooth y WiFi, bandas 2.4 GHz y 5.8 GHz”; [Tesis de la Universidad de las Américas Puebla, México]; Disponible en:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/hernandez_a_r/

- [9] Álvaro Roldán Escolano; “Diseño y simulación de antena plana”; [Proyecto Fin de Carrera Universidad de Navarra]; Disponible en:
<http://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/3546/577434.pdf?sequence=1>
- [10] “Antena”; [Artículo de la Wikipedia]; Disponible en:
http://es.wikipedia.org/wiki/Antena#Clasificaci.C3.B3n_cl.C3.A1sica_de_las_antenas
- [11] “Tipos de Antenas”; Disponible en:
<http://tiposdeantenas.blogspot.com.es/>
- [12] Zürcher, JF.; Gardiol, F.; “Broadband Patch Antennas”; [Libro]; Artech House, 1995
- [13] “Antenas Microstrip”; [Apuntes Online de la Universidad Politécnica de Valencia]; Disponible en:
http://www.upv.es/antenas/Documentos_PDF/Transparencias_reducidas/Tema_9.pdf
- [14] E. Rajo-Iglesias, J.-L. Vazquez-Roy, O. Quevedo-Teruel y L. Inclán-Sánchez; “Dual band planar soft surfaces”; [Microwaves, Antennas Propagation, IET, 3(5): 742_748, august 2009]
- [15] L. Inclán-Sánchez, J.L. Vazquez-Roy, O. Quevedo-Teruel y E. Rajo-Iglesias; “New topologies for miniaturized horizontal corrugations”; En Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on, 1 _3, april 2010]
- [16] David M. Pozar; “Microwave Engineering”; [Libro]; Wiley, 2004